

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté des lettres et sciences humaines

Département de géomatique appliquée

Maîtrise en sciences géographiques

**Analyse multicritère du potentiel de dynamisme de croissance de la végétation au Québec
pour améliorer la périodicité des entretiens forestiers cycliques des lignes hydroélectriques
du réseau de distribution.**

Par

Serge Bricault

Essai présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M.Sc.)

Cheminement en géodéveloppement durable

Avril 2017

© *Serge Bricault, 2017*

Composition du jury

Analyse multicritère du potentiel de dynamisme de croissance de la végétation au Québec pour améliorer la périodicité des entretiens forestiers cycliques des lignes hydroélectriques du réseau de distribution.

Serge Bricault

Cet essai a été évalué par un jury composé de la personne suivante :

Mickaël Germain, directeur de l'essai

(Département de géomatique appliquée, faculté des lettres et sciences humaines)

Table des matières

REMERCIEMENTS	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES FIGURES	V
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	1
1.3 Objectifs	3
2. CADRE THÉORIQUE.....	4
2.1 La croissance des arbres.....	4
2.2 L’élagage et ses effets sur la croissance végétative	6
2.3 Le réseau électrique de distribution d’Hydro-Québec et son entretien.....	8
3. MATÉRIEL ET MÉTHODE	10
3.1 Site d’étude	10
3.2 Données.....	14
3.3 Méthodologie	17
3.3.1 Choix d’une analyse multicritère	17
3.3.2 Description des critères.....	20
3.3.3 La sélection des données sources.....	27
3.3.4 Traitement et préparation des données	29
4. RÉSULTATS.....	32
5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	47
6. CONCLUSION	48
7. RECOMMANDATIONS	50
RÉFÉRENCES.....	51
ANNEXES	55

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur d'essai, Monsieur Mickaël Germain, pour avoir accepté de diriger cet essai et toute l'aide qu'il m'a fournie.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Christian Buteau, ingénieur forestier chez Hydro-Québec pour ses conseils, son aide et pour m'avoir permis de travailler sur ce sujet.

Un autre merci est lancé à Monsieur Bastien Lecigne de l'UQAM pour les renseignements précieux qu'il m'a donnés au tout début du projet me permettant de démarrer du bon pied.

Je remercie également ma conjointe et réviseure Geneviève Meilleur pour sa patience et son aide, sans qui je ne serais pas rendu au point où j'en suis.

Enfin, je remercie aussi les professeurs et collègues de classe que j'ai côtoyés durant les deux ans de la maîtrise en sciences géographiques car ils m'ont permis d'améliorer grandement mes connaissances dans le domaine de la géomatique.

Liste des tableaux

Tableau 1. Niveaux du système hiérarchique de classification du territoire du Québec.	10
Tableau 2. Zones de rusticité et vitesses de croissance d'arbres selon différentes sources.	24
Tableau 3. Détails des critères élaborés pour l'analyse multicritère linéaire pondérée.	26
Tableau 4. Détails des données utilisées.	29

Liste des figures

Figure 1. Image captée en 1998 lors de l'épisode de verglas qui démontre les bris causés par la végétation à un réseau électrique au Québec	2
Figure 2. Schéma des dégagements critiques effectués par Hydro-Québec autour des réseaux électriques selon que la végétation est ornementale ou sauvage et que le réseau à dégager soit monophasé ou triphasé.....	7
Figure 3. Différentes configurations du réseau de distribution et détails des composantes communes aussi à dégager au sommet des poteaux.....	9
Figure 4. Représentation des zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec	12
Figure 5. Classification du territoire selon les caractéristiques de la température annuelle moyenne, des précipitations et des saisons de croissance selon les données climatiques de 1966 à 1996	13
Figure 6. Représentation des valeurs moyennes de température annuelle et pour les trois mois les plus froids de 1966 à 1996	14
Figure 7. Représentation des valeurs de précipitation annuelle moyenne de 1966 à 1996 et des variantes d'altitude du territoire basé sur le modèle numérique d'altitude (MNA) de 1998	15
Figure 8. Représentation des valeurs moyennes de degrés-jours ($> 5^{\circ}\text{C}$) et de la longueur de la saison de croissance de 1966 à 1996.....	16
Figure 9. Diagramme méthodologique.	17
Figure 10. Schéma démontrant le calcul de la combinaison linéaire pondérée de critères normalisés à l'aide d'un SIG	19
Figure 11. Représentation de l'outil de somme pondérée d'ArcGIS.....	32
Figure 12. Découpages des unités de paysage régional.	33

Figure 13. Critère des températures annuelles moyennes.....	35
Figure 14. Critère des niveaux moyens d'altitude.	36
Figure 15. Critère des degrés-jours de croissance annuels moyens (en base de 5 °C).	37
Figure 16. Critère des longueurs annuelles moyennes de la saison de croissance.	39
Figure 17. Critère des précipitations annuelles moyennes.....	40
Figure 18. Critère des zones de rusticité.....	41
Figure 19. Critère des cotes d'utilisation du territoire.	43
Figure 20. Carte brute des niveaux potentiels d'entretien de la végétation en fonction du potentiel de croissance près des lignes hydroélectriques du réseau de distribution.	44
Figure 21. Carte généralisée des niveaux potentiels d'entretien de la végétation en fonction du potentiel de croissance près des lignes hydroélectriques du réseau de distribution.	46

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le Québec est une province qui dépend en grande partie de l'énergie hydroélectrique pour fonctionner (MERN, 2013). En effet, la société d'état Hydro-Québec mise sur pied en 1944 a construit de nombreuses infrastructures au fil du temps dont 63 centrales hydroélectriques pour produire de l'énergie grâce à la force de l'eau des rivières (Hydro-Québec, 2016 et 2017a). Les cours d'eau étant nombreux sur le territoire et la ressource hydrique abondante, cette industrie s'est vite développée pour alimenter la presque totalité des foyers, commerces et industries de la province.

Le contexte environnemental moderne est désormais aux prises avec la réalité du réchauffement climatique qui pousse les nations du globe à adopter des façons de s'alimenter en énergie renouvelable à faibles émissions polluantes (Gagné, 2000). Dans un tel environnement, le Québec a une longueur d'avance avec sa grande production hydroélectrique (Hydro-Québec, 2016).

Toutefois, le courant électrique doit passer par un réseau très étendu de câbles métalliques conducteurs pour relier les centrales productrices et la clientèle, parfois très éloignées l'une de l'autre. Le résultat est un réseau de fils électriques de plus de 116 000 km qui, comme tout type d'installation, doit être entretenu pour en assurer le bon fonctionnement (Hydro-Québec, 2016).

L'entretien d'une ligne électrique doit considérer l'aspect du matériel de la ligne elle-même, mais doit également servir à dégager la végétation de façon préventive qui pousse de part et d'autre des fils. Maintenir cette végétation à l'écart sert à éviter des interruptions de courant ou pire, des bris (Hydro-Québec, 1998). Ces entretiens coûtent autour de 60 millions \$ à la société d'État annuellement (Lecigne *et al.*, 2013).

1.2 Problématique

L'entretien des fils électriques se fait de façon plus ou moins régulière depuis de nombreuses années. Divers incidents météorologiques, comme l'épisode de verglas de l'hiver 1997-1998, ont enseigné au peuple québécois à quel point la végétation autour du réseau électrique peut en menacer l'intégrité (figure 1).



Figure 1 - Image captée en 1998 lors de l'épisode de verglas qui démontre les bris causés par la végétation à un réseau électrique au Québec (source : MESI, 2012)

Au fil des événements, l'élaboration d'un entretien cyclique et de normes internes de dégagement ont été mis en place chez Hydro-Québec, en collaboration avec le Bureau de la normalisation du Québec, pour assurer la sécurité des travailleurs et améliorer la qualité du service en limitant le nombre de pannes (Hydro-Québec, 1998).

Or, le territoire couvert par le réseau hydroélectrique au Québec est vaste et s'étend d'est en ouest sur plus de 1 600 km et du sud vers le nord sur plus de 1 000 km (jusqu'aux installations hydroélectriques). Cette surface est affectée par le climat de façon diverse et est recouverte par une multitude d'espèces d'arbres présentes à un endroit et absentes ailleurs. Donc, quand vient le temps de déterminer la fréquence à laquelle l'entretien cyclique devra être produit, plusieurs facteurs régissant la croissance de ces diverses espèces d'arbres doivent être pris en considération selon l'endroit sur le territoire où elles se trouvent (Follett *et al.*, 2016).

La délimitation de zones de potentiel de croissance des différentes espèces d'arbres pour le territoire québécois en lien avec le degré de menace que cette croissance amène aux câbles électriques n'existe tout simplement pas (Follett *et al.*, 2016). De ce fait, l'entretien des lignes électriques est effectué selon un cycle théorique organisé et mis en place par une équipe d'ingénieurs forestiers qui se basent sur leur expérience et les rétroactions et commentaires qu'ils obtiennent des divers intervenants sur le terrain (Hydro-Québec, 2015). Or, les ingénieurs forestiers d'Hydro-Québec n'ont pas de système multicritère pour délimiter les zones de potentiel de croissance en tant qu'outil pour accomplir la tâche.

1.3 Objectifs

Dans l'optique de parvenir à réaliser des travaux ciblés selon les besoins et pour tirer le maximum des budgets considérables alloués aux opérations d'entretien de la végétation, il serait avantageux de mieux caractériser le territoire en fonction du niveau potentiel de la vitesse de croissance des arbres par unité de paysage régional.

L'objectif principal de ce projet est de concevoir avec un système d'information géographique générique et ouvert un indice du potentiel de la dynamique de croissance des arbres du Québec méridional à l'échelle du paysage régional, et ainsi mieux définir la périodicité des entretiens de la végétation autour des lignes de distribution électrique. Cet indice est adapté à la production de cartes qui guideront les gestionnaires en charge de l'entretien des lignes électriques.

Quatre objectifs spécifiques ont été établis pour rencontrer l'objectif principal :

- (1) analyser ce qui régit la vitesse de croissance des arbres d'essence problématique pour le réseau ;
- (2) caractériser le territoire québécois par unité de paysage régional ;
- (3) définir les variables primaires expliquant la croissance végétale à l'intérieur des paysages régionaux, puis finalement ;
- (4) produire une analyse multicritère permettant d'illustrer le dynamisme potentiel de la croissance des arbres dans la partie sud du Québec.

2. CADRE THÉORIQUE

2.1 La croissance des arbres

La croissance des arbres est influencée par divers facteurs qui font en sorte que certaines espèces poussent à un endroit où d'autres ne le peuvent pas. Au Canada, les zones qui délimitent les endroits où chaque espèce d'arbre individuelle peut pousser selon ses capacités particulières se définissent comme des zones de rusticité (McKenney *et al.*, 2014). À la base, les zones de rusticité ont été développées dans les années 1960 par Agriculture Canada pour servir aux agriculteurs, et par la suite, le monde de l'horticulture a repris ces données (McKenney *et al.*, 2006). Ces zones diffèrent des aires de distribution des espèces qui indiquent plutôt la répartition géographique à un moment donné d'une espèce. La zone de rusticité sert davantage à caractériser une portion du territoire selon divers facteurs clés régissant normalement la croissance des plantes, notamment la rigueur de l'hiver (longueur, intensité, couvert nival, etc.) (Farrar, 1996 ; McKenzie *et al.*, 2006 ; OIFQ, 1997).

Les aires de distribution et les zones de rusticité mettent en évidence les principaux facteurs limitant la croissance de la végétation : soit la quantité de lumière disponible (photopériode), la chaleur disponible (valeurs de température qui se combinent à la photopériode pour donner le nombre de degrés-jours de croissance et la longueur de la saison de croissance), la quantité d'eau disponible (en termes de précipitation annuelle) et le type de sol (Richer-Leclerc *et al.*, 1993 ; Silva *et al.*, 2016). Les données de latitude et d'altitude servent souvent à recouper les valeurs de chaleur disponible selon les règles générales suivantes : plus l'élévation monte par rapport au niveau de la mer ou plus le degré de latitude s'élève (en allant vers le nord) et plus la température moyenne baisse (Corona et Rovéra, 2007 ; McKenzie *et al.*, 2001 ; MDDELCC, 2002).

De ce fait, les zones de rusticité peuvent être facilement adaptées aux changements climatiques mondiaux, car elles ne sont pas reliées à une seule espèce, mais bien à un ensemble de facteurs et conditions du milieu. En effet, le découpage des zones de rusticité a été revu au moins deux fois depuis le découpage original par Ouellet et Sherk en 1967 et chaque révision illustre bien l'impact des changements climatiques (McKenney *et al.*, 2014).

Les aires de distribution peuvent changer de façons moins prévisibles face aux changements climatiques. En effet, elles peuvent être modifiées selon d'autres facteurs comme les précipitations,

la fréquence des feux de forêts et des épidémies d'insectes ravageurs, l'arrivée de maladies et de parasites étrangers (due à la globalisation des marchés mondiaux) et la compétition inter-espèce provenant d'espèces avantagées par le réchauffement, qui leur permet un étalement dans de nouveaux secteurs où elles étaient autrefois limitées par des conditions plus froides (Brandt, 2009 ; Housset, 2015 ; Kreyling *et al.*, 2015 ; Logan *et al.*, 2011).

Les espèces d'arbres du Québec sont toutes soumises à une croissance dite rythmique ; c'est-à-dire qu'elle est interrompue à intervalle régulier par l'arrivée de l'hiver, puis redémarre ensuite à l'arrivée du printemps (Lecigne *et al.*, 2013). À mesure que l'arbre grandit à partir de ses bourgeons apicaux au sommet de chaque branche, il colonise davantage d'espace aérien et la disposition des feuilles est induite par l'organogénèse provenant de la division cellulaire des méristèmes terminaux et des diverses hormones de croissance (Lecigne *et al.*, 2013; Rost *et al.* 1998).

La forme de chaque feuille individuelle et leur disposition sur le rameau sont des éléments plutôt constants étant régis par l'hérédité de l'espèce (Barthélémy et Caraglio, 2007). Par contre, la longueur de chaque tige et leur orientation sont plus influencées par la lumière disponible, qui est le facteur le plus important affectant la croissance des végétaux (Lecigne *et al.*, 2013; Rost *et al.* 1998). Outre la lumière, d'autres signaux sont perçus par les arbres et les plantes en général et peuvent provoquer des réactions comme la température, la photopériode, la quantité d'eau disponible, les éléments chimiques dans le sol et diverses forces physiques comme le vent et l'occurrence de blessures par des animaux ou des moyens mécaniques (Rost *et al.*, 1998).

À partir du tronc principal, les branches les plus vigoureuses deviennent normalement plus volumineuses, augmentant ainsi leur surface d'aubier afin de leur permettre de conduire davantage de sève pour alimenter les organes qu'elles supportent (d'autres branches secondaires, leur feuillage, les fleurs et les fruits). Plus une branche démarre son embranchement loin du tronc, moins elle reçoit de sève, car sa surface d'aubier est plus petite (Lecigne *et al.*, 2013).

Cette structure hiérarchique est également liée à la capacité d'échange en eau entre le sol, l'arbre et l'air. Cet échange par évapotranspiration se fait en fonction de la quantité de sève disponible par rapport à la résistance hydraulique différente de chaque portion de l'arbre. Cette résistance est liée à la quantité de vaisseaux conducteurs et de fenêtres d'échanges entre la plante et l'air (ex. les

stomates des feuilles et des parties vertes des ramilles) (Barthélémy et Caraglio, 2007 ; Lecigne *et al.*, 2013).

L'indice de rusticité, qui permet de déterminer les limites géographiques de la présence des espèces, peut également permettre d'interpréter un gradient de la vigueur de croissance des essences voulant que plus on s'approche de la limite nordique de la répartition d'une espèce, moins elle aura une croissance vigoureuse. Lecigne *et al.* (2013) ont d'ailleurs fait ce constat pour le frêne de Pennsylvanie (*Fraxinus pennsylvanica*) et l'érable argenté (*Acer saccharinum*) qui ont démontré des taux de croissance se rapprochant du bouleau à papier (*Betula papyrifera*) dans les villes nordiques de Baie-Comeau, Rouyn-Noranda et Saguenay, alors que leur croissance était de loin supérieure au bouleau dans les villes plus au sud comme Sherbrooke, Québec et Gatineau.

2.2 L'élagage et ses effets sur la croissance végétative

En général, l'élagage est une opération qui consiste à couper complètement ou en partie une branche ou des parties d'arbres pour en modifier la disposition de la cime selon différents objectifs variés : corriger un déséquilibre dans la structure de l'arbre, assurer la sécurité de la population environnante, dégager des structures ou encore orienter, limiter, ou guider la croissance d'un arbre sont quelques exemples d'objectifs réalisables par l'élagage (CSL, 2014 ; OIFQ, 1997). Pour Hydro-Québec, l'élagage sert à établir ou maintenir une distance de dégagement selon une distance critique par rapport aux équipements électriques de moyenne tension (CSL, 2014 ; Hydro-Québec, 2015 ; OIFQ, 1997). Cette distance critique varie de 2 à 3 m (figure 2) selon la position d'une partie de l'arbre par rapport à l'équipement électrique à dégager. Cette norme est mise en place car ces équipements ne sont pas recouverts d'une gaine isolante, faisant en sorte qu'un arc électrique peut se produire au contact d'une branche, ce qui amène un danger d'électrocution (OIFQ, 1997).

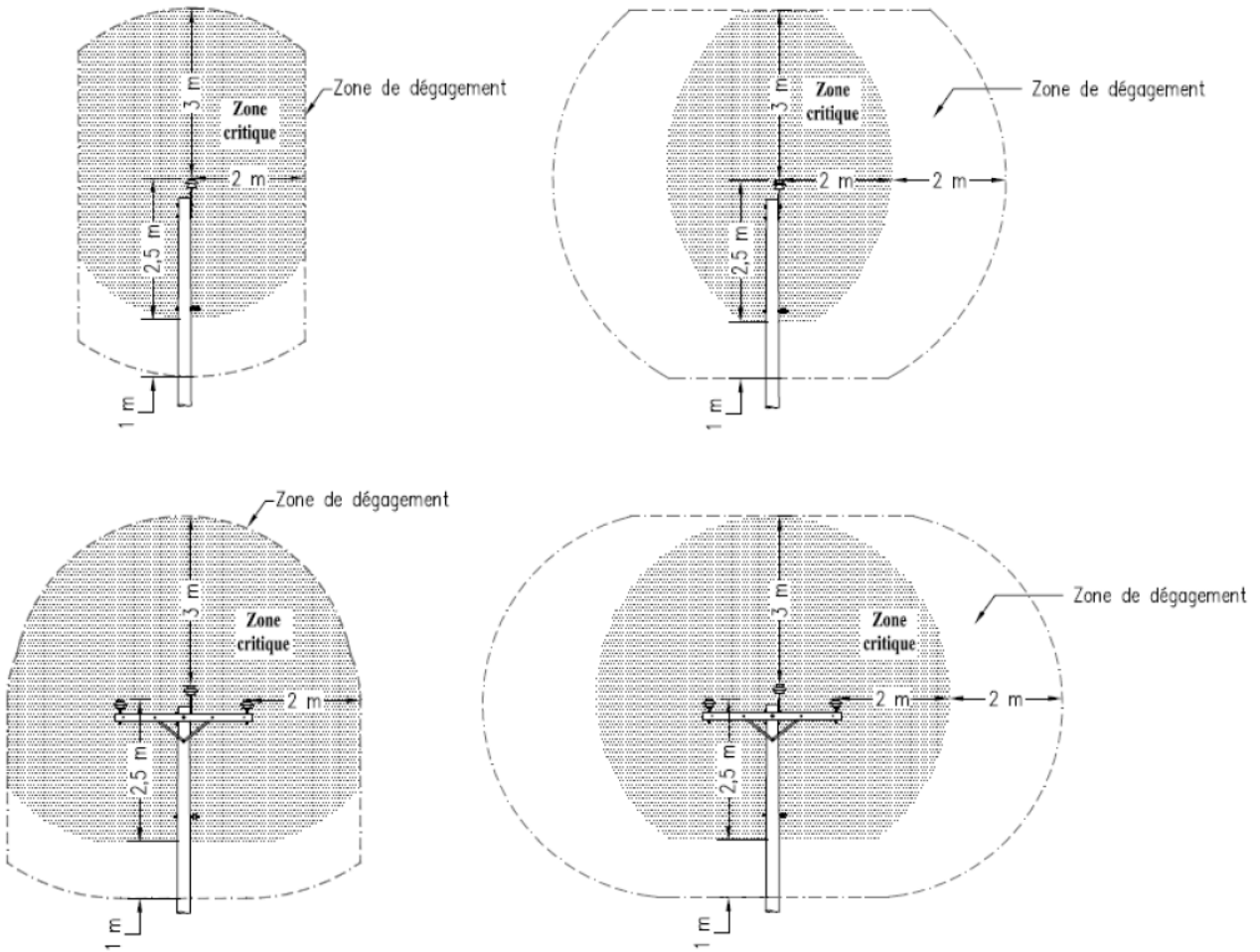


Figure 2 - Schéma des dégagements critiques effectués par Hydro-Québec autour des réseaux électriques selon que la végétation est ornementale (à gauche) ou sauvage et que le réseau à dégager soit monophasé (en haut) ou triphasé (source : Hydro-Québec, 2015)

Lors de l'élagage des branches terminales d'un arbre, les segments apicaux qui renferment de fortes concentrations de l'hormone de croissance auxine sont enlevés, ce qui provoque la croissance des bourgeons latéraux et qui produit ultérieurement plus de branches (Rost *et al.*, 1998). Les hormones sont à la base de la réactivité des végétaux à un stimulus quelconque, mais d'autres signaux plus directs peuvent envoyer des messages à différentes parties de la plante pour corriger ou modifier une facette de son comportement biologique (Barthélémy et Caraglio, 2007 ; Rost *et al.*, 1998). Des signaux électriques ressemblant à des pulsions nerveuses passent d'une cellule à l'autre et communiquent des messages en cours de route sur l'état général de certains organes de la plante. Aussi, des changements sur la tension hydraulique dans le système vasculaire de la plante vont

alerter d'autres systèmes de la perte subite de certains organes (racines, feuilles ou branches) nécessaires à l'évapotranspiration (Rost *et al.*, 1998).

L'élagage fait à forte intensité peut induire une réduction de l'accroissement de la cime, mais elle peut aussi causer de fortes réactions chez l'arbre en le stimulant agressivement pour rétablir la portion de houppier qu'il a perdu, influencé par la disponibilité de lumière qui atteint les zones de repousse (Lecigne, 2013 ; Lecigne *et al.*, 2013). De plus, l'intensité de la réaction de l'arbre à la taille est influencée par divers facteurs selon les portions de la cime de l'arbre qui sont touchées, l'espèce, et le climat ambiant (Follett *et al.*, 2016 ; Lecigne *et al.*, 2013).

Des études récentes (Lecigne *et al.*, 2013 ; Follett *et al.*, 2016) ont démontré que l'érable argenté avait la plus grande vitesse de croissance de la repousse après élagage, suivi par le frêne de Pennsylvanie, le bouleau à papier et l'érable de Norvège (*Acer platanoides*), en réponse à des conditions d'élagage en milieu urbain et péri-urbain. La croissance la plus rapide a été mesurée durant la première année suivant la taille et atteignait un maximum moyen de 1,5 m, ce qui est significativement plus rapide que l'élongation de branches non-taillées et se rapproche dans certains cas de la longueur des branches élaguées l'année précédente (Follett *et al.*, 2016 ; Lecigne, 2013).

2.3 Le réseau électrique de distribution d'Hydro-Québec et son entretien

L'entretien de la végétation se fait autour de la presque totalité des infrastructures d'Hydro-Québec, autant près des barrages, des centrales, des lignes de hautes et moyennes tensions, et les coûts associés à tous ces entretiens sont considérables (Lecigne, 2013). Cet entretien est essentiel car près de 40 % des pannes d'électricité sont causées par la chute de branches ou d'arbres sur des lignes du réseau de distribution (Hydro-Québec, 2017b).

Les câbles électriques les plus répandus sont par ailleurs du type « moyenne tension » et forment le réseau filaire servant à alimenter directement les résidences, commerces et petites industries regroupant la majorité des clients (Hydro-Québec, 2017b). Les câbles électriques de moyenne tension sont des fils métalliques conduisant l'électricité sous une charge de 750 à 34 500 volts. Ils peuvent se retrouver sous différentes configurations sur le territoire (figure 3) et comprendre un ou plusieurs câbles. Les transformateurs, disjoncteurs, interrupteurs, sectionneurs et autres équipements associés font également parti de ce réseau et sont entretenus au même titre face à la végétation (Hydro-Québec, 2015). Les opérations d'élagage effectuées servent donc à dégager ces

files et équipements afin de diriger la croissance future des arbres élagués, et ce, dans le but de limiter la fréquence des interventions pour assurer la protection du réseau et de réduire le plus possible les modifications apportées à la cime des arbres élagués.

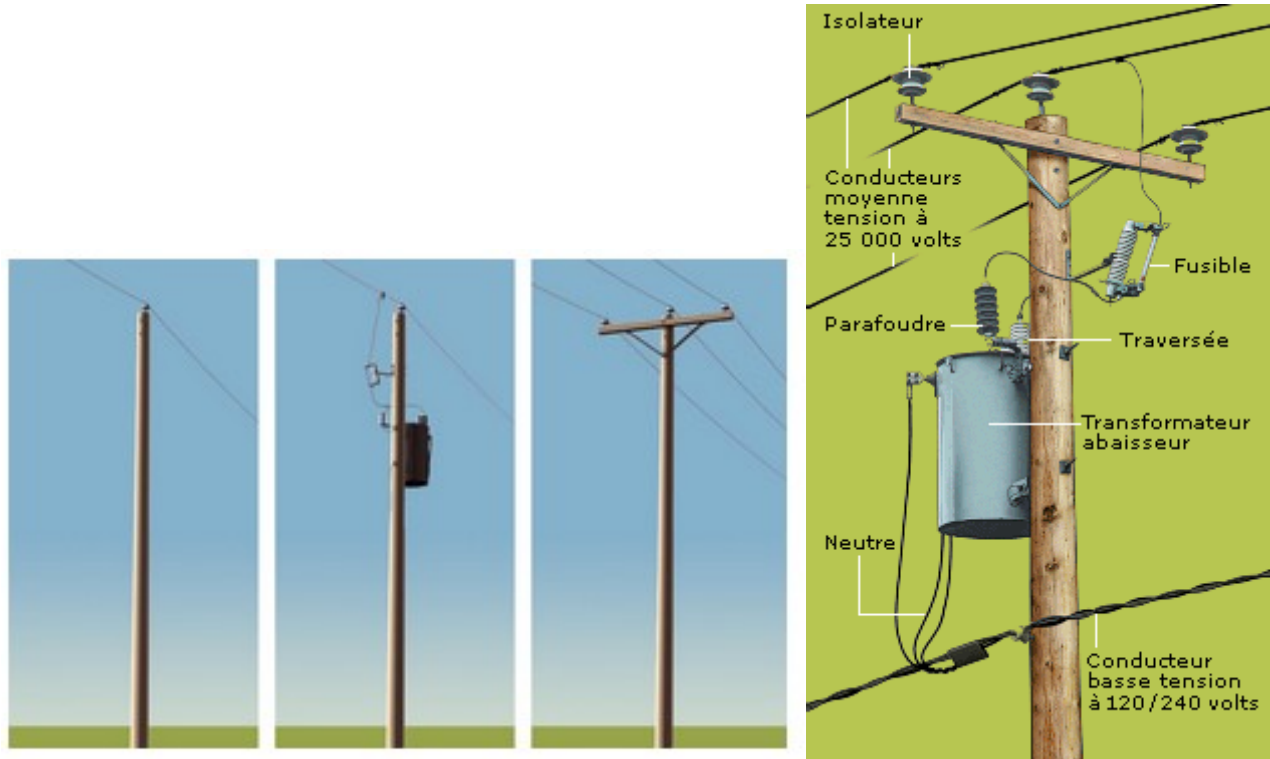


Figure 3 - Différentes configurations du réseau de distribution (à gauche) et détails des composantes communes aussi à dégager au sommet des poteaux (source : Hydro-Québec, 2017c)

Les autres infrastructures immobilières (édifices, barrages, centrales, etc.) et filaires (lignes de basse et haute tension, sous-terrain) ne sont pas considérées dans le cadre de ce travail.

Certains chercheurs suggèrent l’allongement des cycles de taille de dégagement des lignes de distribution électrique ou encore d’adapter les interventions à la dynamique de croissance des espèces dans un but d’efficacité budgétaire (Lecigne *et al.*, 2013). Le présent travail va dans la même veine voulant améliorer l’efficacité cyclique des interventions d’entretien de la végétation.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Site d'étude

Le site d'étude considéré pour ce travail se trouve dans la province du Québec au Canada et comprend l'ensemble du territoire québécois couvert par le découpage des paysages régionaux tel que défini par Robitaille et Saucier (1998), au sud du 52° degré de latitude. Le choix de ce découpage a été jugé pertinent pour les besoins du présent projet car il regroupe l'ensemble des caractéristiques territoriales nécessaires pour appuyer l'analyse sur des critères géographiques, climatologiques et forestiers par le biais de l'observation de la répartition de certaines essences à caractère indicateur du climat (MFFP, 2016a ; Robitaille et Saucier, 1998).

Le paysage régional est la septième par ordre du plus grossier au plus fin des onze unités du système hiérarchique de classification du territoire mis au point par le Ministère des Ressources Naturelles du Québec de l'époque (tableau 1) (MFFP, 2016a ; Robitaille et Saucier, 1998).

Tableau 1- Niveaux du système hiérarchique de classification du territoire du Québec

Appellation du niveau	Nombre d'unités
Zone de végétation	3
Sous-zone de végétation	6
Domaine bioclimatique	10
Sous-domaine bioclimatique	12
Région écologique	48
Sous-région écologique	71
Paysage régional	185
District écologique	2545
Étage de végétation	Nd
Type écologique	Nd
Type forestier	Nd

Le territoire québécois au sud du 52° degré de latitude comprend la sous-zone de la forêt boréale continue au nord se changeant graduellement à la zone tempérée nordique plus au sud incluant les sous-zones de la forêt mélangée (arbres feuillus et résineux) et de la forêt décidue (majorité d'arbres feuillus) (figure 4). Les domaines bioclimatiques retrouvés à partir du nord en allant vers le sud sont la pessière à mousses et la sapinière à bouleau blanc qui s'étendent jusqu'au sud de Val-d'Or,

Roberval et Forestville ; la sapinière à bouleau jaune qui s'étend au nord du réservoir Baskatong, de La Tuque, Québec et L'Islet ; l'érablière à bouleau jaune, l'érablière à tilleul et l'érablière à caryer cordiforme qui complètent la partie sud de la province, qui est par ailleurs la plus habitée.

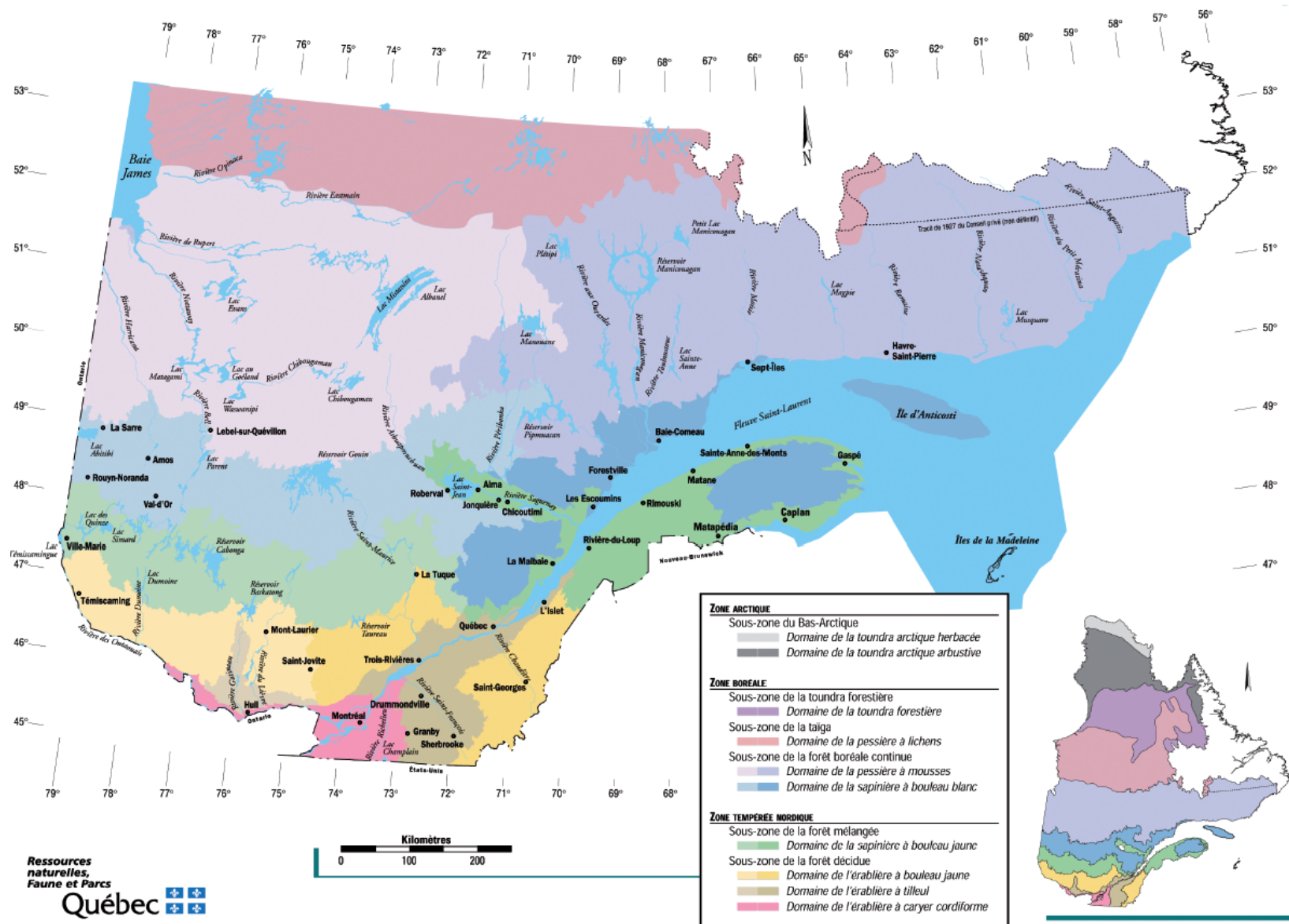


Figure 4 - Représentation des zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec (source : MFFP, 2016a)

Toujours pour présenter le site d'étude, on retrouve dans le document « Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec » du MDDELCC préparé par Gerardin et McKenney en 2001 (révisé en 2002), une bonne caractérisation bioclimatique du territoire.

La moitié sud de la province est couverte par les classes de température allant de subpolaire froide (SpF) à modérée (M), de précipitation subhumide (SH) à humide (H) et de saison de croissance courte (C) à longue (L) (figure 5).

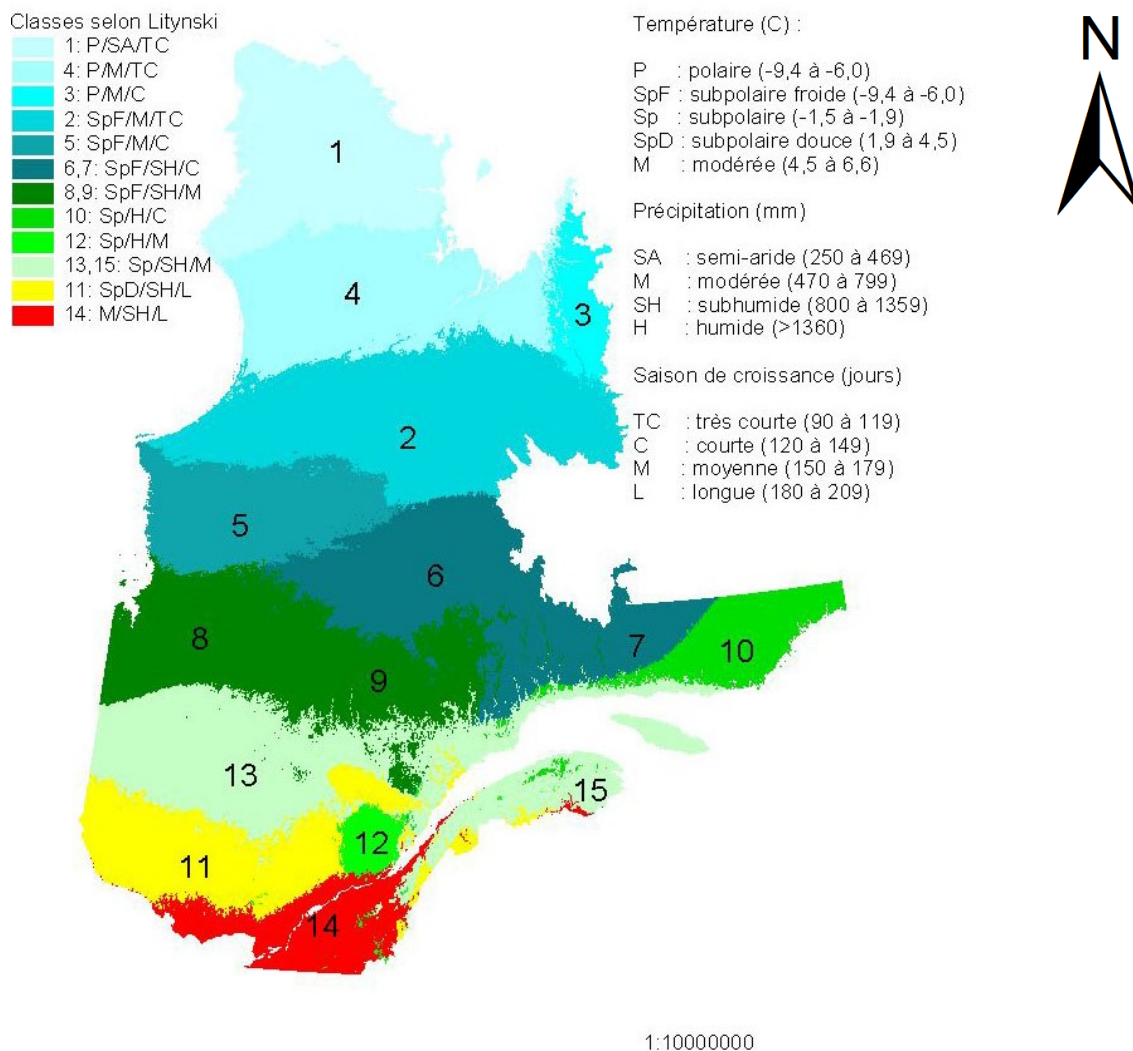


Figure 5 - Classification du territoire selon les caractéristiques de la température annuelle moyenne, des précipitations et des saisons de croissance selon les données climatiques de 1966 à 1996 (source : MDDELCC, 2002)

3.2 Données

Plus en détails, les valeurs de température annuelle sont d'une moyenne nordique de $-3,1$ à $-1,1$ °C allant jusqu'à $4,7$ à $6,6$ °C (figure 6). Étant donné que les valeurs climatiques utilisées pour le rapport du MDDELCC s'arrêtent en 1996, il est à noter que ces valeurs vont avoir tendance à augmenter suite au réchauffement climatique.

Les valeurs moyennes de température pour les trois mois les plus froids sont pertinentes car elles expliquent en partie les délimitations des zones de rusticité qui sont définies principalement par la rigueur de l'hiver. Toujours en partant du nord de la zone d'étude, les valeurs sont d'un minimum moyen de $-19,5$ à $-17,5$ °C remontant jusqu'à $-9,7$ à $-7,7$ °C pour les mois les plus froids de l'hiver (figure 6).

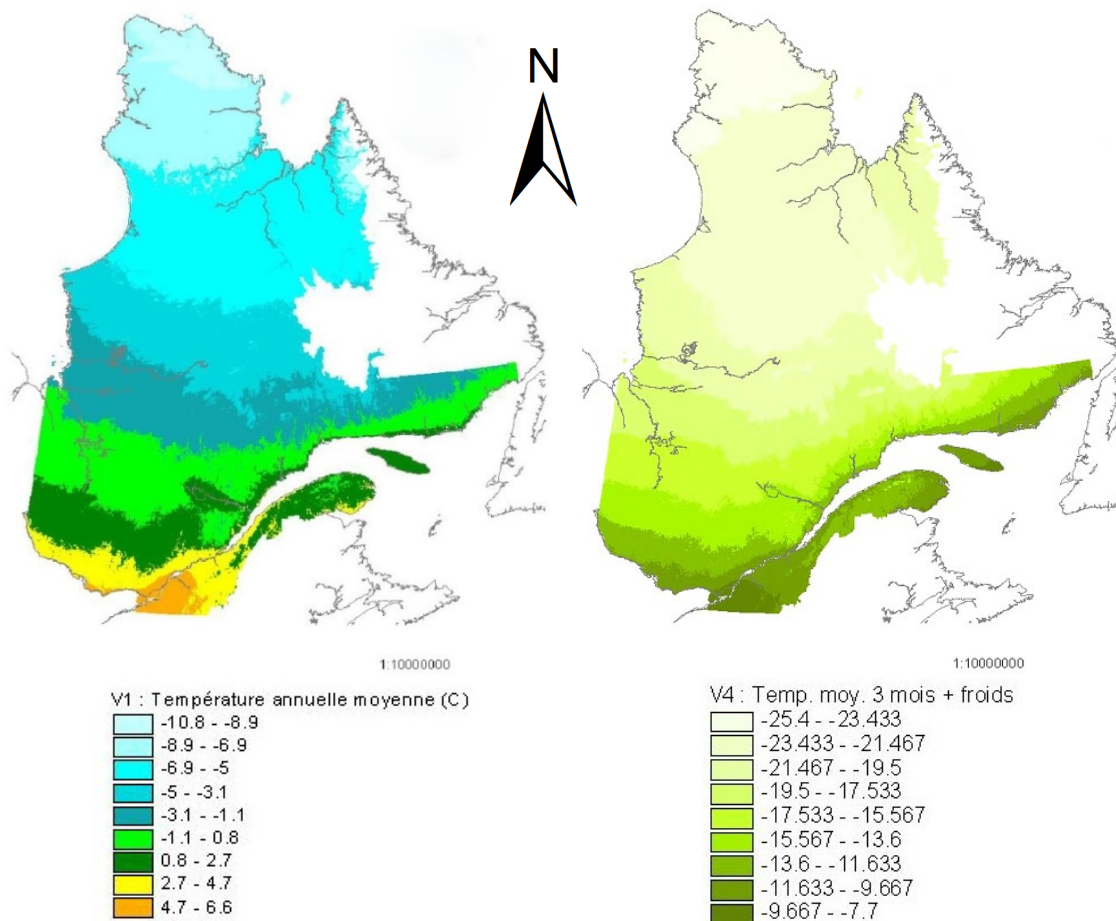


Figure 6 - Représentation des valeurs moyennes de température annuelle (à gauche) et pour les trois mois les plus froids de 1966 à 1996 (source : MDDELCC, 2002)

Le gradient des précipitations annuelles totales présente aussi une tendance dans l'axe nord-sud, mais moins bien définie que les données de température (figure 7). En effet, les précipitations semblent plus concentrées à certains endroits du territoire, tel que le massif forestier situé entre la Ville de Québec et Saguenay avec des valeurs extrêmes supérieures à 1 400 mm. Plus au nord, les niveaux de précipitations tournent autour d'un minimum de 850 mm, s'élevant à une moyenne autour de 1 000 mm plus au sud près de la frontière américaine.

Le relief de la zone d'étude est en grande majorité sous la barre des 520 m d'altitude (figure 7) à l'exception du même massif forestier entre Québec et Saguenay où l'altitude est beaucoup plus élevée qu'ailleurs avec des valeurs approchant les 1 000 m.

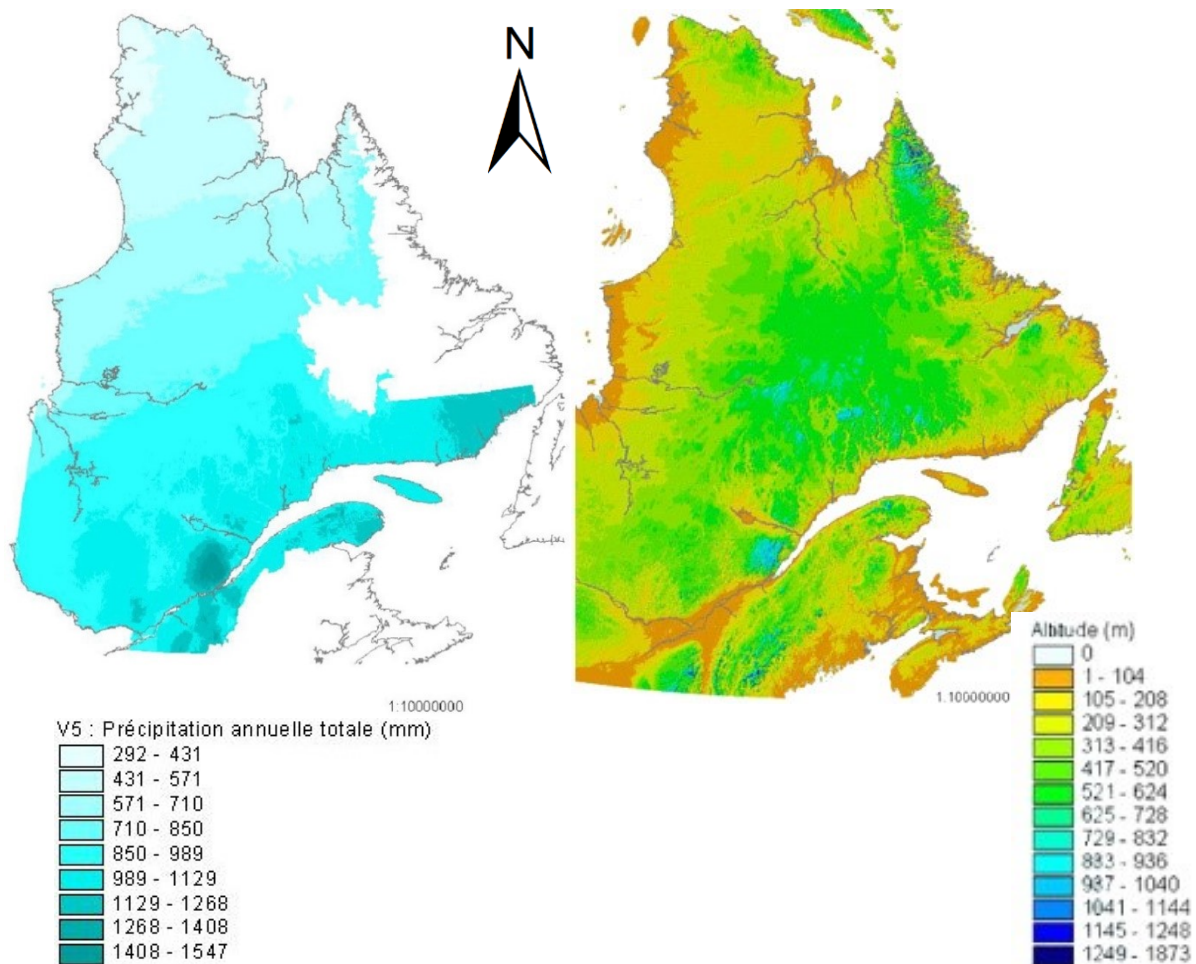


Figure 7 - Représentation des valeurs de précipitation annuelle moyenne de 1966 à 1996 (à gauche) et des variantes d'altitude du territoire basé sur le modèle numérique d'altitude (MNA) de 1998 (source : MDDELCC, 2002)

À partir des données de température moyenne, les valeurs de degrés-jours de croissance annuels supérieures à 5 °C suivent un gradient à forte tendance nord-sud à l'exception des zones les plus en altitude de la zone d'étude, ayant des valeurs de 700 à 930 degrés-jours pour atteindre près de 2 100 degrés-jours de croissance dans l'extrême sud de la province (figure 8).

En dernier lieu, la représentation des longueurs de la saison de croissance en nombre de jours basée sur une température de 5 °C et plus suit une tendance similaire (figure 8). Toujours à partir du nord, la période de croissance est très courte autour du 52° degré de latitude avec à peine 124 jours et devient beaucoup plus longue dans le sud du territoire avec un maximum moyen de 221 jours de croissance.

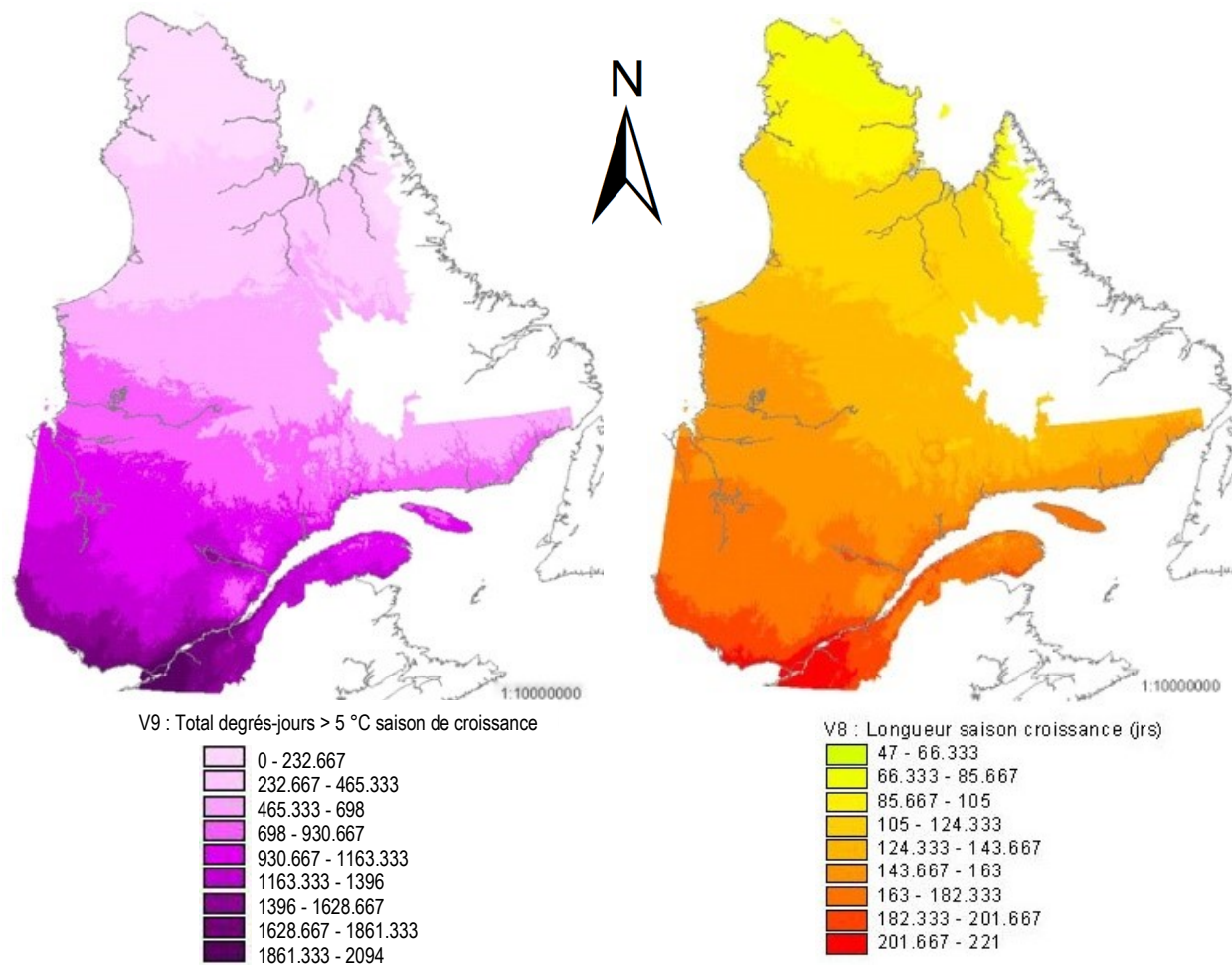


Figure 8 - Représentation des valeurs moyennes de degrés-jours (> à 5 °C) (à gauche) et de la longueur de la saison de croissance de 1966 à 1996 (source : MDDELCC, 2002)

3.3 Méthodologie

Un diagramme méthodologique sert à bien cerner l'ensemble des étapes à franchir pour compléter le travail (figure 9).

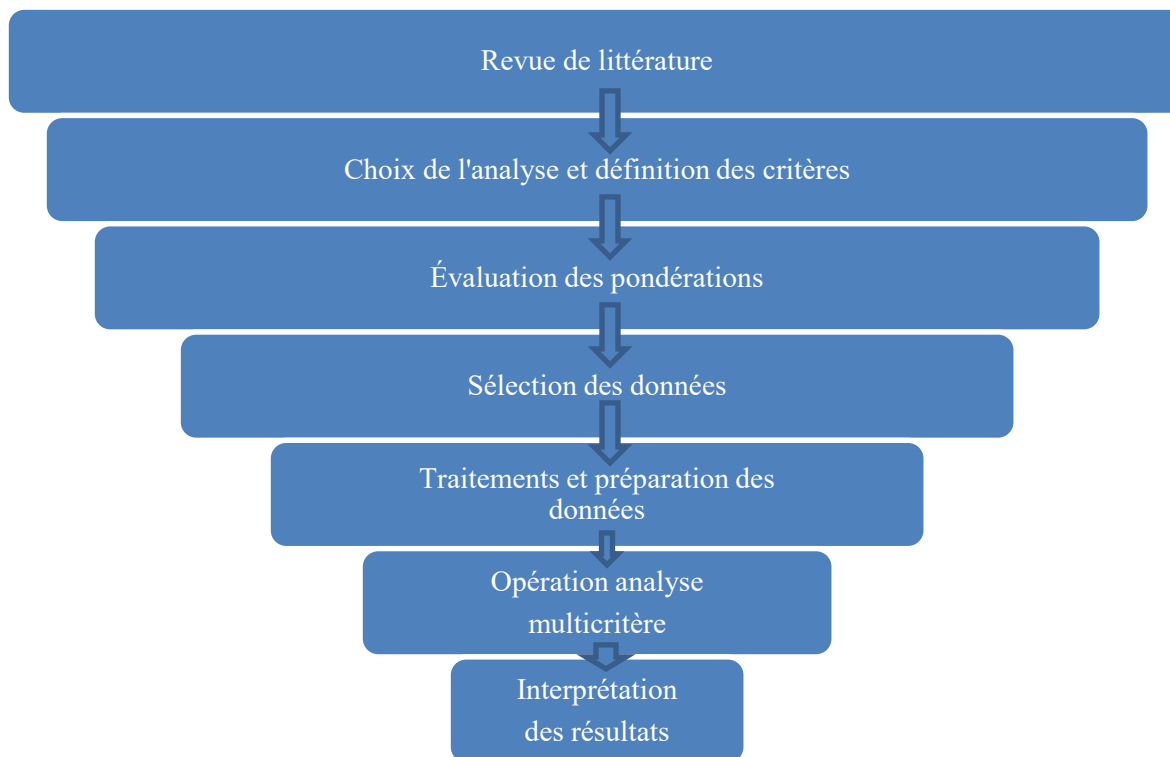


Figure 9 - Diagramme méthodologique

La première étape consiste à réaliser une revue de littérature pour permettre d'établir l'état des connaissances en lien avec le sujet traité. Découlant de cette première étape importante, le choix du type d'analyse multicritère est réalisé ainsi que la définition des critères à utiliser.

3.3.1 Choix d'une analyse multicritère

Dans le cadre de cet essai, l'analyse multicritère associée à un système d'information géographique (SIG) a été choisie afin de démontrer visuellement le potentiel de dynamisme de croissance de la végétation dans les unités de paysage régional. L'analyse multicritère permet de combiner et d'intégrer ensemble plusieurs critères déterminants pour la croissance des végétaux. Le SIG est l'outil privilégié pour la mise en œuvre de ce travail et pour présenter un résultat cartographique final.

L'analyse multicritère implique généralement de spécifier des critères et des contraintes. Les critères servent à établir un niveau de qualité atteint par unité de surface, et les contraintes servent à disqualifier certaines unités de surface selon des raisons particulières, mais avant de choisir des critères, il faut déterminer un type d'analyse multicritère particulier plutôt qu'un autre. La méthode par somme pondérée est choisie pour cet essai, mais plusieurs autres méthodes existent (PROMETHEE, ELECTRE, etc.).

Dans la perspective de développer un SIG générique et ouvert, la méthode dite par somme pondérée est simple, disponible dans tous les logiciels SIG, permet d'apposer une pondération à chaque critère de sorte à obtenir un classement complet des actions en fin d'analyse (Caillet, 2003). Cette analyse de sensibilité permet également d'identifier un ensemble de scénarios pertinents et d'évaluer différentes alternatives (Mouine, 2011). Grâce à la simplicité de cette méthode en regard à l'utilisation de multiples critères environnementaux, dont les échelles sont très variables en quantité et dans le temps, il est jugé pertinent de procéder avec celle-ci pour obtenir un classement du potentiel de dynamisme de croissance de la végétation au sein des unités de paysage régional.

Pour la méthode de la somme pondérée, le SIG calcule la combinaison des critères normalisés sur une plage numérique commune pour ressortir le niveau d'importance atteint pour chaque unité de surface. Il effectue donc la somme de chaque couche géospatiale de chaque critère où la valeur la plus élevée représente l'endroit où la croissance a le plus fort potentiel (figure 10) (Drobne et Lisec, 2009).

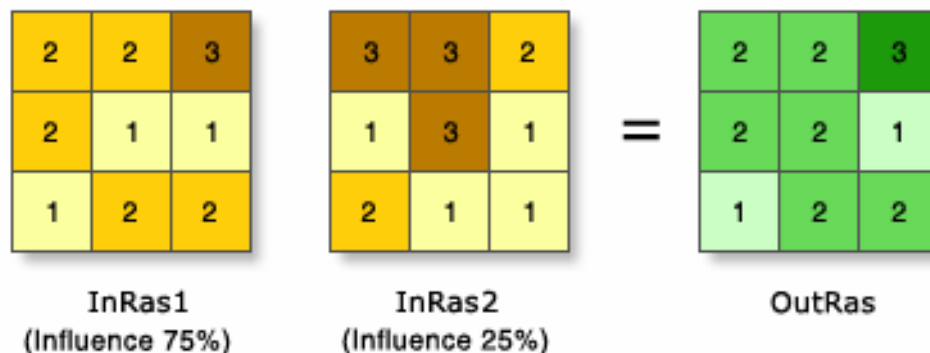


Figure 10 - Schéma démontrant le calcul de la combinaison linéaire pondérée de critères normalisés à l'aide d'un SIG (source : ESRI, 2016)

Dans la figure 10, le calcul effectué par le logiciel est d'additionner les produits « valeur * influence » pour donner une valeur entière arrondie dans l'ensemble final « OutRas ». Si on considère le pixel du milieu des trois ensembles, le détail est donc $(1 \times 0,75) + (3 \times 0,25) = 1,5$ arrondi à 2 (ESRI, 2016).

Pour poursuivre le parallèle avec la figure 10, les valeurs dans les grilles représentent la valeur normalisée des classes et le pourcentage d'influence est le poids relatif à l'importance qu'il revêt dans la dynamique de croissance des végétaux. Ainsi, les critères sont choisis selon leur pertinence en lien avec la croissance des végétaux et sous la condition qu'ils soient quantifiables et que les données soient disponibles. Ensuite, ils doivent être normalisés sur une même échelle pour pouvoir les comparer et donc, les critères comportant plusieurs classes doivent être redéfinis selon une norme pour chaque nouvelle classe. La valeur est plus élevée si la classe est plus favorable et plus faible dans le cas contraire. Ces valeurs sont donc 1, 3, 5, 7 et 9 et permettent une bonne distinction du potentiel de croissance de chaque unité (Maingueneau, 2016). Le choix d'établir cinq valeurs normalisées donne un gradient de valeurs permettant de bien estimer les nuances d'une unité à l'autre et il est à noter que certains critères peuvent avoir moins de valeurs que d'autres en fonction des classes qu'ils présentent.

Par la suite, parce que chaque critère n'a pas la même influence sur la croissance des végétaux, des poids relatifs sont attribués à chacun (Maingueneau, 2016). Pour déterminer les poids relatifs, l'utilisation d'un ratio arbitraire est basée sur la revue de littérature, l'expérience professionnelle et les connaissances académiques de l'auteur, ainsi que les recommandations des directeurs de l'essai,

mais nous avons gardé un système générique et ouvert pour offrir un outil personnalisable pour les experts d'Hydro-Québec.

La seule contrainte de la présente analyse est de considérer uniquement les paysages où se trouvent les principales lignes de distribution du réseau de moyenne tension. Les sections du réseau qui sont orphelines sont souvent en région plus éloignées et moins habitées, ce qui permet des travaux d'entretien de la végétation plus agressifs pour maximiser la période de retour. C'est la raison pour laquelle ces lignes électriques sont comprises dans les paysages régionaux qui ne sont pas considérés dans la cartographie finale.

3.3.2 Description des critères

Le choix des critères est basé sur une communication avec un expert d'Hydro-Québec (communication personnelle), mais nous avons fait le choix d'ajouter d'autres critères que nous avons jugés pertinents afin d'enrichir l'analyse multicritère pour la création d'un indice de potentiel de croissance des arbres du Québec méridional.

3.3.2.1 Critères de la thermopériode

Au niveau des critères, il faut tout d'abord considérer la relation avec la lumière disponible et la quantité de chaleur suffisante pour permettre la croissance des espèces d'arbres, ce qui équivaut à la thermopériode qui constitue un facteur limitant la croissance des végétaux (Daly *et al.*, 2012 ; Logan *et al.*, 2011 ; Rost *et al.*, 1998).

Plusieurs critères de base peuvent servir à qualifier la période de croissance disponible aux arbres en considérant trois éléments distincts : la longueur de la saison de croissance, le nombre de degrés-jours de croissance et la température annuelle moyenne. Ces trois indices bioclimatiques sont reliés car ils sont tous influencés par différents facteurs comme la latitude, l'altitude et la proximité de grandes masses d'eau (MDDELCC, 2002). Donc, malgré la grande importance que revêt chacun de ces critères dans la croissance de la végétation, il faut éviter de surévaluer leur impact individuel. C'est pourquoi la longueur de la saison de croissance se voit attribuée le poids relatif le plus important avec 25 %. Les trois critères sous-jacents (degré-jour de croissance, température annuelle moyenne, altitude moyenne) à la saison de croissance ont une pondération de 5 % chacun pour qu'ils expriment les différences du milieu. Même si ces critères permettent de recomposer le critère des longueurs de saison de croissance, leur analyse permet d'affiner l'analyse spatiale.

La longueur de la saison de croissance de la végétation, les valeurs sont définies par le nombre de jours où la température moyenne quotidienne est égale ou supérieure à 5 °C durant cinq jours consécutifs à partir du 1^{er} mars et se termine lorsque la température moyenne quotidienne atteint -2 °C après le 1^{er} août (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013 ; Logan *et al.*, 2011 ; Robitaille et Saucier, 1998). Les travaux de Logan *et al.* (2011) ont démontré que les saisons de croissance de la province s'allongent graduellement depuis les années 1970 et devraient poursuivre leur ascension jusqu'à l'horizon projeté de 2100 (Logan *et al.*, 2011). Les valeurs normalisées sont établies par intervalles égaux de façon proportionnelle, c'est-à-dire que plus la saison est longue et plus la valeur est élevée, jusqu'à un maximum de 9.

Les degrés-jours de croissance (DJC) sont calculés en faisant la somme des températures maximale (TMax) et minimale (TMin) de la journée qui est divisée par 2 pour ensuite le soustraire de la valeur de référence de 5 °C (TRéf). Ils cumulent pour chaque degré de température quotidienne au-dessus de cette température de référence et ces valeurs quotidiennes sont ensuite cumulées sur une base annuelle (Robitaille et Saucier, 1998). Il peut y avoir d'autres valeurs de référence calculées à partir de 0, 10 ou 15 °C et le calcul suit l'équation suivante (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013):

$$DJC = \frac{TMax + TMin}{2} - TRéf$$

Un changement au niveau des degrés-jours de croissance disponibles dans un secteur va avoir un impact sur la phénologie des plantes, c'est-à-dire sur le débourrement des bourgeons, la floraison et d'autres processus biochimiques internes des plantes, de même qu'influencer la capacité de certaines espèces à pousser plus au nord (Logan *et al.*, 2011). Comme pour le critère de la longueur de saison de croissance, la classification par intervalles égaux est choisie et ajustée proportionnellement pour que la valeur normalisée de 1 à 9 soit plus élevée plus la moyenne des degrés-jours est élevée.

La température annuelle moyenne forme alors un critère sous-jacent aux deux précédents mais doit être considérée à part entière car elle est un des éléments centraux de la croissance et de la productivité des végétaux (Paquette et Messier, 2011). Cette température est définie comme la moyenne des températures mensuelles moyennes. Comme pour le critère précédent, le poids relatif du critère est de 5 % et les classes sont établies de façon proportionnelle aux valeurs de température

voulant que plus il fait chaud et plus la croissance des végétaux est importante. Avec des valeurs moyennes de -4 à 6 °C, les classes sont alors découpées par intervalles égaux de 2 °C avec la première classe qui représente les températures moyennes entre -4 et -2 °C et la dernière classe de valeur normalisée de 9 comprenant les températures entre 4 et 6 °C.

L'altitude du site d'étude varie du niveau de la mer (0 m) jusqu'à légèrement plus de 1 000 m. Or, l'élévation est fortement reliée aux autres déterminants de la thermopériode et donc, la pondération de 5 % y est fixée. Les valeurs d'altitude moyenne sont classées de façon inversement proportionnelle voulant que plus l'élévation est grande, moins la classe est importante. Les données allant jusqu'à l'altitude maximale du Québec (arrondie à 1 000 m) sont séparées en cinq classes, par tranche de 200 m d'élévation, avec la première classe méritant la valeur normalisée de 9 et la dernière (800 à 1 000 m) méritant la valeur de 1, la moins propice à la croissance des arbres.

3.3.2.2 Les précipitations totales annuelles

La quantité d'eau disponible provenant des précipitations sert à caractériser le niveau d'aridité d'un endroit et constitue un autre critère qualifiant la vigueur à laquelle peut pousser la végétation sans tenir compte de son emplacement par rapport à un cours ou plan d'eau (Corona et Rovéra, 2007). Toutefois, la saisonnalité des précipitations peut avoir un impact important sur la distribution et la croissance des espèces selon, par exemple, la quantité de neige au sol l'hiver pouvant isoler les racines en surface des effets néfastes du gel, la quantité d'eau disponible dans le sol au printemps au début de la période de croissance ou même la quantité de précipitations tombant l'été pour limiter les épisodes d'incendies de forêt (Gagné, 2000 ; Logan *et al.*, 2011). D'ailleurs, il y a plus de précipitations enregistrées dans les endroits à haute altitude sur le site d'étude où la végétation fait face à des conditions plus rigoureuses. À cause de ce niveau de complexité lié aux valeurs de précipitations annuelles, ce critère a donc une pondération importante de 15 % mais moindre que celle pour l'ensemble des critères précédents liés à la thermopériode. Les classes sont séparées par intervalles égaux avec une valeur normalisée proportionnelle aux niveaux de précipitations (ex. : moins de 846 mm obtient la classe 1, entre 846 mm et 1011 mm obtient la classe 3, etc.).

3.3.2.3 Les zones de rusticité

Les zones de rusticité peuvent former un critère de poids relatif moyen à titre d'élément indicateur. La variabilité considérable du découpage de ces zones en fonction des sept variables climatiques considérées dans le calcul des index fait en sorte qu'il est préférable de ne pas assigner la plus

grande importance à ce critère car les changements climatiques globaux l'influence de façon variée. En résumé, ces sept variables climatiques sont la moyenne mensuelle des températures (°C) minimales journalières du mois le plus froid, moyenne de jours sans période de gel (au-dessus de 0 °C), quantité de précipitations (mm) de juin à novembre, moyenne mensuelle des températures (°C) maximales journalières du mois le plus chaud, facteur hivernal basé sur la quantité de pluie accumulée (mm) en janvier, épaisseur moyenne (mm) du couvert nival, vitesse de la plus forte bourrasque de vent (km/h) mesurée depuis les 30 dernières années (McKenney *et al.*, 2001). Même le système américain des zones de rusticité du United States Department of Agriculture (USDA) dispose d'autant de variabilité, voulant également que le Québec soit de plus en plus hospitalier à divers types de végétation (McKenney *et al.*, 2014). Pourtant, certaines essences comme le thuya occidental (*Thuja occidentalis*) ne pousseraient pas plus rapidement sous l'effet du réchauffement climatique, étant plutôt limitées par d'autres facteurs comme la qualité de station locale ou le régime de précipitations (Housset, 2015). De plus, différents ouvrages n'assignent pas la même zone de rusticité aux mêmes espèces (tableau 2), ce qui explique pourquoi la pondération de 22 % de ce critère n'est pas plus élevée.

Pour définir des classes aux zones de rusticité, les espèces dont la croissance est la plus rapide sont utilisées pour guider la pondération associée à chaque zone. Les travaux de Lecigne *et al.* (2013) ont démontré que l'érable argenté est un des arbres dont la croissance après élagage est la plus rapide. Selon l'ouvrage de Farrar (1996) et du « Guide sylvicole du Québec » de Publications Québec (2014), le peuplier à feuilles deltoïdes (*Populus deltoides*) serait l'espèce d'arbre indigène ayant la croissance la plus rapide. Ces deux espèces se retrouvent dans la zone de rusticité 2b et les autres espèces à croissance rapide se retrouvent à partir de la même zone de rusticité et plus au sud. En effet, le tableau 2 démontre que l'orme de Sibérie (*Ulmus pumila*), le frêne de Pennsylvanie et l'érable à Giguère (*Acer negundo*) peuvent pousser aux côtés de l'érable argenté et du peuplier à feuilles deltoïdes (Farrar, 1996 ; Hydro-Québec, 1998 ; OIFQ, 1997 ; Publications Québec, 2014). Voir en annexe pour un exemple de carte des zones de rusticité du Québec.

Le bouleau à papier présente également une vitesse de croissance rapide et peut pousser plus au nord dans la zone de rusticité 2a. Étant donné que les sources mentionnant les zones de rusticité datent de 1997 et 1998, le réchauffement climatique a eu 20 ans pour repousser les limites

nordiques où les arbres peuvent pousser. Pour cette raison, la zone 1b se voit accorder la valeur de 1 même si les espèces mentionnées dans le tableau 2 ne semblent pas pouvoir y pousser.

Les zones 2a et 2b obtiennent la valeur de 3, car même si les espèces d'arbres à croissance rapide peuvent y pousser, ils sont à la limite de leur aire de distribution et ne devraient pas atteindre des niveaux de croissance si spectaculaires que dans les zones du sud. Les zones 3a et 3b ont une valeur normalisée de 5, car les conditions de rusticité sont de moins en moins difficiles. Les zones 4a et 4b ont une valeur de 7 et plus au sud dans les zones de rusticité 5a et 5b, la rigueur est à son plus faible pour le territoire à l'étude et donc les croissances devraient être au plus rapides, ce qui explique la valeur normalisée de 9 pour ce secteur.

Tableau 2 - Zones de rusticité et vitesses de croissance d'arbres selon différentes sources

Nom commun	Nom latin	Zone de rusticité ²	Zone de rusticité ⁴	Vitesse de croissance ¹	Vitesse de croissance ²	Vitesse de croissance ³	Vitesse de croissance ⁴
Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i>	2b	2b	Rapide	Très rapide	Rapide-très rapide	Rapide
Peuplier à feuilles deltoïdes	<i>Populus deltoides</i>	2b	2b	Très rapide	Très rapide	Très rapide	Rapide
Orme de Sibérie	<i>Ulmus pumila</i>	3b	2b	Rapide	Très rapide	nd	Rapide
Érable à Giguère	<i>Acer negundo</i>	2b	2a	Rapide	Très rapide	nd	Rapide
Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i>	2a	2a	Rapide	Rapide	Rapide	Rapide
Frêne de Pennsylvanie	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	2b	3a	Rapide	Rapide	Rapide	Rapide
Mélèze laricin	<i>Larix laricina</i>	1a	1a	nd	Moyenne	Rapide – Très rapide	Moyenne
Pin blanc	<i>Pinus strobus</i>	2b	2b	Rapide	Rapide	Rapide	Rapide

¹ : Farrar, 1996 ; ² : Hydro-Québec, 1998 ; ³ : Publications Québec, 2014 ; ⁴ : OIFQ, 1997

3.3.2.4 L'utilisation du territoire

L'utilisation du territoire n'a pas un impact direct sur la croissance des arbres du site d'étude qui poussent à proximité du réseau de distribution. Cependant, il a tout de même un effet circonstanciel sur la dynamique de croissance de certaines espèces. En milieu entièrement forestier, il y a potentiellement plus de végétation à proximité du réseau. Celle-ci est élaguée davantage car elle est en milieu qualifié de non-ornemental par le département de la maîtrise de la végétation d'Hydro-

Québec. Cet élagage plus intense sert à limiter le besoin de refaire l'entretien des lignes et allonge le cycle d'entretien. Par ailleurs, les espèces à croissance rapide sont des espèces dites de lumière, c'est-à-dire qu'elles poussent davantage lorsqu'elles sont pleinement exposées au soleil, ce qui est moins fréquent dans un massif forestier où la compétition pour la lumière est féroce (OIFQ, 1997).

Le milieu agricole pour sa part comporte une portion d'habitation humaine de types résidentiel, industriel et commercial. La végétation de ces endroits, qui se trouve régulièrement sous les lignes de distribution, forme souvent de petits massifs forestiers fortement exploités ainsi que des lignes d'arbres délimitant diverses surfaces exploitées et servant d'écran éolien et visuel en bordure de champs. Ces arbres sont en pleine lumière et bénéficient des amendements apportés aux terres arables et leur croissance peut alors être plus rapide.

En milieu urbain, l'élagage des arbres ornementaux par Hydro-Québec (voir figure 2) est moins intense, ce qui provoque des périodes de retour d'entretien plus courtes. En plus, diverses espèces d'arbres non-indigènes peuvent être implantées dans le milieu, comme l'orme de Sibérie, et certaines de ces espèces ont des croissances très rapides. Qui plus est, la densité de population prend de l'importance en milieu urbain où le distributeur d'électricité doit considérer que plus il y a de gens qui vivent dans un secteur et plus il faut assurer la qualité de service d'alimentation en électricité. C'est d'ailleurs cet impact envers la clientèle du distributeur électrique qui explique le poids relatif de 23 % assigné à ce critère, car même si les arbres ne poussent pas nécessairement plus rapidement aux endroits où vit la majorité de la clientèle, il faut tout de même leur apporter une attention particulière et des cycles d'entretien plus intenses.

Pour définir cinq classes, les pourcentages des utilisations du territoire sont multipliés par une pondération distincte à chacune pour quantifier leur importance relative. Les valeurs de surface forestière sont multipliées par un facteur de 3, les valeurs urbaines par un facteur de 9 et les valeurs agricoles par un facteur de 5. Les classes ainsi obtenues sont séparées par un intervalle de 0,5 pour obtenir cinq classes uniformes.

Le tableau 3 résume l'ensemble des critères et leur poids relatif, ainsi que la délimitation des classes et les valeurs normalisées qui leurs sont attribuées.

Tableau 3 - Détails des critères élaborés pour l'analyse multicritère linéaire pondérée

Critères	Poids relatif	Classes	Valeurs normalisées
Longueur de la saison de croissance	25%	127 - 144 jours 145 - 160 jours 161 - 177 jours 178 - 193 jours 194 - 210 jours	1 3 5 7 9
Degré-jour de croissance (dj), base 5 °C (moyenne annuelle)	5%	750 à 999 dj 1000 à 1249 dj 1250 à 1499 dj 1500 à 1749 dj 1750 à 2000+ dj	1 3 5 7 9
Température annuelle moyenne	5%	-4 à -2 °C -2 à 0 °C 0 à 2 °C 2 à 4 °C 4 à 6 °C	1 3 5 7 9
Altitude moyenne	5%	801 - 1000 m 601 - 800 m 401 - 600 m 201 - 400 m 0 - 200 m	1 3 5 7 9
Précipitation totale annuelle	15%	681 - 846 mm 847 - 1012 mm 1013 - 1177 mm 1178 - 1343 mm 1344 - 1508 mm	1 3 5 7 9
Zone de rusticité	22%	1b 2a et 2b 3a et 3b 4a et 4b 5a et 5b	1 3 5 7 9
Utilisation du territoire	23%	3 à 3.49 3.5 à 3.99 4 à 4.49 4.5 à 4.99 5 et +	1 3 5 7 9

3.3.3 La sélection des données sources

Plusieurs données sont utilisées pour l'élaboration des critères identifiés dans la section précédente (tableau 4). La plupart des données utilisées sont libres et gratuites pour les étudiants de l'Université de Sherbrooke, sauf la couche géospatiale démontrant la répartition des lignes du réseau de distribution hydroélectrique. En effet, cette donnée est fournie par Hydro-Québec à titre d'indicateur de la localisation des lignes seulement pour en extraire les unités de paysage régional traversées par une ligne de distribution, afin de cibler la représentation finale de la carte de dynamique de croissance des végétaux.

La donnée de base concernant les unités de paysage régional provient directement du site Web du ministère Forêts, Faune et Parcs (MFFP) et comporte le découpage des huit premiers niveaux du système hiérarchique de classification écologique du territoire. Le même site renferme aussi les données spatiales et tabulaires des districts écologiques. Ces unités territoriales sont plus petites que les paysages régionaux et comprennent les données en lien avec l'altitude moyenne en mètre par rapport au niveau de la mer, de même que les pourcentages d'utilisation du territoire (forestier, urbain, agricole).

En ce qui a trait aux zones de rusticité, la base de données géospatiales provient du site de données ouvertes du gouvernement du Canada dont l'éditeur est Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et recouvre le pays au complet.

Toujours à partir du site de données ouvertes du gouvernement du Canada, plusieurs données climatiques y sont compilées et rendues disponibles au format géospatiale par AAC, comme les données de précipitations annuelles et les températures mensuelles moyennes qui compilent les données de 1971 à 2000. Ces couches de données vectorielles sont sous forme de cellules plus ou moins régulières qui laissent supposer que les fichiers d'origine sont matriciels. Ainsi, la résolution spatiale de 100 km² des fichiers vectoriels provient des frontières de chaque caractéristique changeant selon un pas minimal de 10 km de côté.

Dans le même site, les longueurs de saison de croissance de la végétation et le nombre de degrés-jours annuel moyen sont également disponibles sous forme de points vectoriels présentant des données légèrement plus à jour couvrant l'horizon de 1979 à 2008. Ces couches de points ne recouvrent pas l'ensemble du territoire à l'étude, alors elles sont superposées et combinées à la

couche de polygones vectoriels des « écodistricts » (différent des districts écologiques du gouvernement provincial) produite en 1996 pour le Cadre écologique national pour le Canada compilant des données de 1961 à 1990.

Finalement, les couches de données générales pour la localisation du territoire d'étude (cours et plans d'eau, limites des régions administratives, localisation des villes d'intérêt au sujet de l'essai) proviennent de la base de données géographique et administrative du ministère Énergie et Ressources naturelles du Québec (MERN) récupérées à même leur site Web. Ces données servent à l'habillage des cartes finales pour localiser le lecteur.

Tableau 4 - Détails des données utilisées

Nom	Type	Source	Critère
Zones de rusticité des plantes au Canada, 2000	vectorel	Agriculture et Agroalimentaire Canada (2017)	Délimitation des zones de rusticité des plantes
Classification écologique IEQM	vectorel	MFFP (2016a)	Découpage des paysages régionaux et districts écologiques
Banque données districts	table	MFFP (2016a)	Altitude moyenne et Utilisation du territoire par district écologique
Disposition des lignes de distribution électrique	vectorel	Hydro-Québec (confidentiel)	Contrainte des superficies finales à considérer
Écodistricts du Canada version 1 et Agroclimat du Québec - Cumul des degrés-jours (base 0, 5, 10) d'avril à octobre	vectorel/table	Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013)	Degrés-jours de croissance de 1971-2000 et 1979-2008
Moyenne des températures moyennes mensuelle à long terme	vectorel	Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013)	Température annuelle moyenne
Écodistricts du Canada version 1 et Agroclimat du Québec - Longueur moyenne de la saison de croissance	vectorel/table	Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013)	Longueur de saison de croissance de 1971-2000 et 1979-2008
Accumulation de précipitations moyenne annuelle à long terme, pour les années 1971 à 2000	vectorel	Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013)	Précipitations annuelles moyennes
Lieux habités (habit_p)	vectorel	MERN (2010)	Localisation des villes
Hydrographie linéaire (hydro_l)	vectorel	MERN (2010)	Tracé linéaire des cours d'eau
Hydrographie de surface (hydro_s)	vectorel	MERN (2010)	Polygone des plan d'eau
Régions administratives (region_admin_shp)	vectorel	MERN (2010)	Limites des régions administratives

3.3.4 Traitement et préparation des données

La préparation des données dans le logiciel ArcGIS, qui est utilisé tout au long du travail, commence avec le changement de projection cartographique pour que chaque couche de données puisse se superposer parfaitement. Le format choisi pour le présent travail est le WGS84, largement

utilisé par le ministère AAC, car plusieurs couches vectorielles provenant de ce département sont projetées de cette façon.

Par la suite, un certain nettoyage de la couche principale est à effectuer. En effet, les unités de paysage régional hors de la zone d'étude dont l'identifiant numérique est supérieur à 151 comprenant l'extrême est de la Côte-Nord, les unités concernant l'Île d'Anticosti, les Îles-de-la-Madeleine et celles se trouvant entièrement en milieu aquatique (zones 201 à 204) sont retirées. Au final, seuls les paysages régionaux croisés par les principales lignes électriques de moyenne tension d'Hydro-Québec sont conservés pour l'analyse.

Les critères sont maintenant prêts à être ajoutés au projet cartographique. Une par une, les couches subissent une opération de découpage pour éliminer les entités de chaque couche qui débordent de l'aire d'étude. Elles se superposent alors parfaitement aux 85 paysages régionaux croisés par les principales lignes du réseau de distribution et les données sont ensuite modifiées ou transformées au besoin. Dans tous les cas, des classes de valeurs normalisées (1, 3, 5, 7 et 9) sont établies et ajoutées dans la table de données des couches de chaque critère et serviront à l'analyse multicritère ultérieurement.

Les premiers critères ajoutés au projet sont ceux des zones de rusticité et des précipitations annuelles moyennes et sont transformés tel que décrit précédemment. Ensuite viennent les critères d'élévation et des proportions d'utilisation du territoire qui sont extraits de la table descriptive provenant de la « Banque de données descriptives des districts écologiques » produite par le MFFP en juin 2016. Une jonction est alors mise en place entre la couche vectorielle et le tableau de données comportant 1 275 entités pour permettre l'affichage des données tabulaires jointes aux polygones des districts écologiques.

Pour les données relatant les longueurs de saison de croissance des végétaux et le nombre de degrés-jours de croissance annuel moyen, un ajustement est apporté à plus de la moitié des entités des « écodistricts » du gouvernement fédéral. En effet, la couche de polygones de base couvrant l'horizon temporel de 1961 à 1990 comprend des valeurs de moyennes pour ces deux critères. Toutefois, une seconde couche vectorielle de points a été ultérieurement produite pour le Québec et comprend des moyennes des deux mêmes critères plus à jour dans l'horizon de 1979 à 2008. Ces points se superposent à 30 des 55 polygones de la couche des « écodistricts » ce qui permet de

recalculer les moyennes pour les polygones qui comprennent des points et si le polygone d'un « écodistrict » n'est pas touché par un point, il conserve alors sa valeur moyenne originale. Le résultat est un portrait plus près de la réalité actuelle de ces données importantes de la thermopériode car il permet d'élargir la période d'échantillonnage qui est de 1961 à 1990 pour les polygones avec la période 1979 à 2008 pour les points.

Les données de température moyenne sont fournies sous forme mensuelle. Ainsi, pour obtenir une représentation géographique des valeurs annuelles de température, il faut d'abord procéder au découpage spatial de chaque couche de données pour les 12 mois, pour après les convertir au format matriciel. Ensuite, une nouvelle couche matricielle est générée en calculant la moyenne des températures par cellule à l'aide d'une calculatrice matricielle du logiciel. À partir de ce point, il suffit d'ajouter une colonne à la table de données de la nouvelle couche des moyennes de température pour y insérer les classes définies par intervalles.

Par après, il s'agit de transformer au format matriciel les couches vectorielles (tableau 4) par le champ des classes des valeurs normalisées. En préparant la conversion des couches, il importe de spécifier que pour les cas où une cellule comprend plus d'une entité, les valeurs sont alors attribuées selon la méthode « maximum combined area » qui assigne la valeur au pixel couvrant la plus grande partie de la cellule de la matrice. Toutes les matrices ont la même résolution spatiale de 2 000 m, ce qui produit des pixels de 4 km² de superficie. Cette résolution est suffisamment fine pour bien dégager les variations du potentiel de la dynamique de croissance des végétaux.

Comme dernière étape, il faut combiner les matrices des critères avec une sommation pondérée afin d'effectuer la somme des couches de critère en considérant la pondération établie précédemment (figure 11). Le résultat est une couche matricielle avec une classe pour chaque pixel démontrant le niveau de la dynamique de croissance potentielle voulant que plus la valeur est grande, plus les arbres peuvent pousser vite.

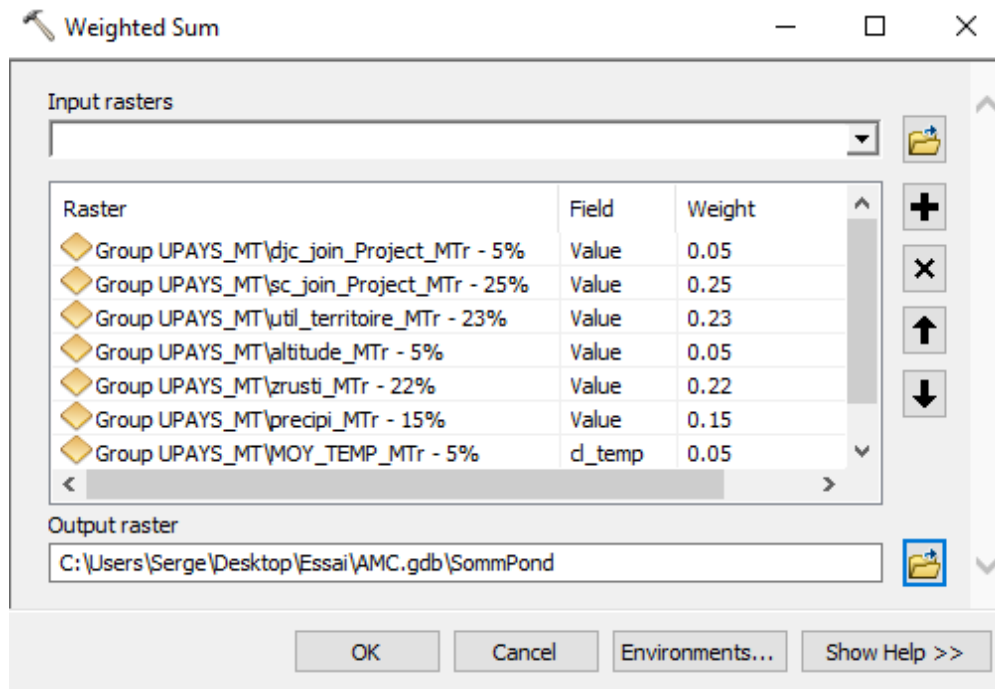


Figure 11 - Représentation de l'outil de somme pondérée d'ArcGIS

4. RÉSULTATS

Pour bien saisir le résultat de l'analyse multicritère, il importe de bien considérer la cartographie des critères à analyser. Au départ, le découpage de l'aire d'étude est important car il sert de gabarit pour la superposition de chaque couche d'information. La carte de la figure 12 présente le découpage effectué à deux niveaux : la répartition des unités de paysage du Québec méridional, c'est-à-dire au sud du 52° degré de latitude (en rouge) puis les unités de paysage croisées par les principales lignes du réseau de distribution d'Hydro-Québec (en violet). L'analyse cible uniquement ces dernières unités pour fournir un résultat le plus éloquent et précis possible pour le distributeur. Les unités conservées forment un large corridor au nord et au sud du fleuve Saint-Laurent, englobant la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et une bonne partie de l'Outaouais au sud-ouest. L'Abitibi-Témiscamingue forme un bloc distinct complètement à l'ouest et la portion centrale de la pointe gaspésienne en élévation ne fait pas partie des unités conservées.

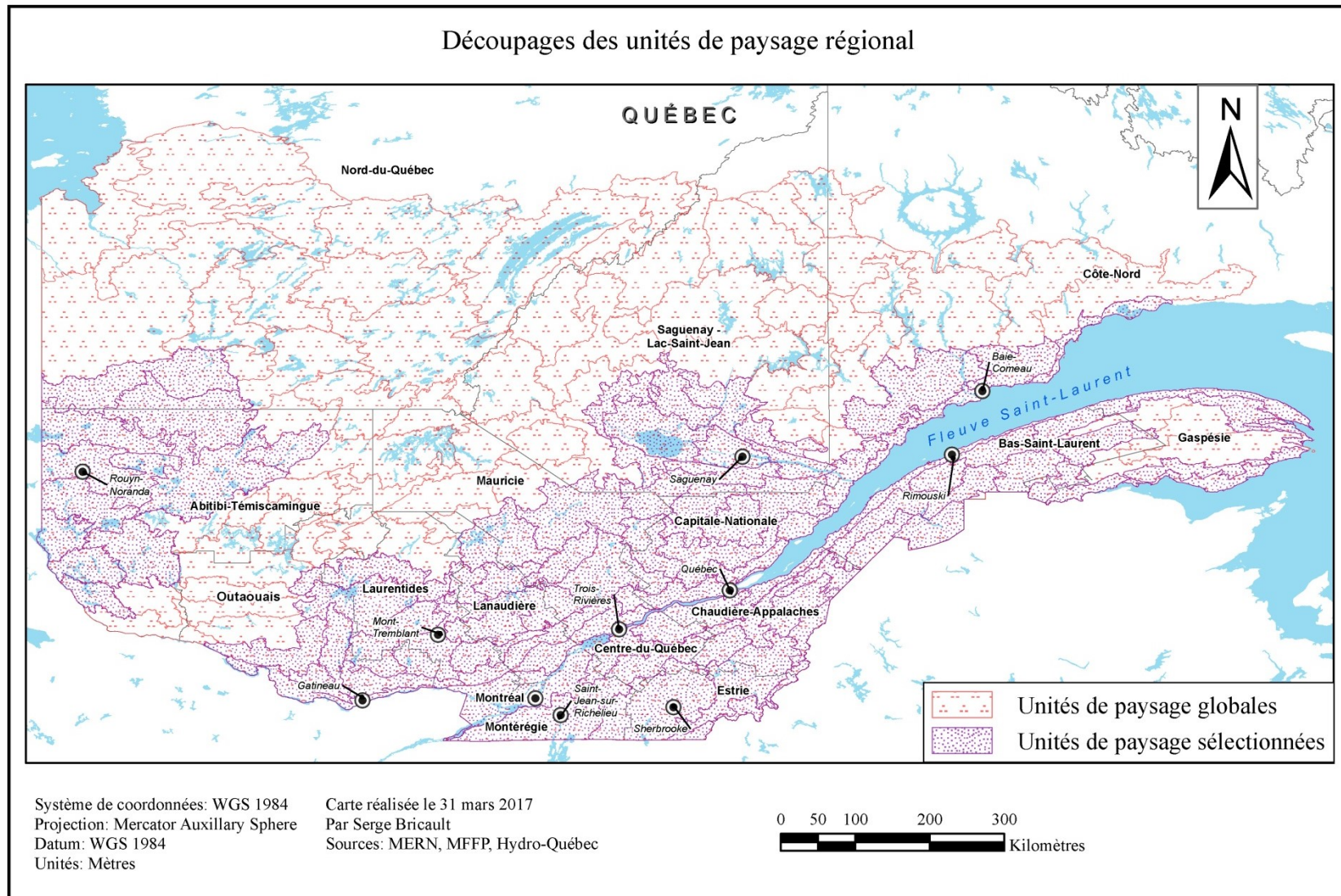


Figure 12 - Découpages des unités de paysage régional

Les différentes cartes pour chacun des critères utilisés ont la même classification, bien que certaines possèdent plus ou moins de classes.

Tel que mentionné à la section 3.3.2.1, les critères de la thermopériode sont reliés et le critère le plus important de cette catégorie est celui des longueurs moyennes de la saison de croissance. Les critères de température, altitude et nombre de degrés-jours sont toutefois maintenus car ils servent à approfondir l'étude du territoire et permettent de mieux cibler les sites de microclimats.

La carte des températures annuelles moyennes identifie quatre classes (figure 13). Le centre sud de l'aire d'étude est la portion ayant la plus haute moyenne de température et la portion nord du territoire est la plus froide. L'influence de la rivière des Outaouais est notable en observant l'étendue vers l'ouest de la zone en rouge (grossièrement entre Montréal et Gatineau). Les endroits en orange complètent la portion sud de la province et s'étend plus au nord, rejoignant certaines parties littorales de la Gaspésie de même que l'extrémité australe du bloc de l'Abitibi-Témiscamingue. La zone en vert au nord de la ville de Québec est plus froide car elle est en altitude.

La carte des niveaux moyens d'altitude présente cinq classes (figure 14). Les niveaux d'altitude les plus près du niveau de la mer se trouvent majoritairement dans le couloir fluvial, en périphérie de la pointe gaspésienne, le long de la rivière des Outaouais et de la rivière Gatineau. Le bassin du lac Saint-Jean est également à basse altitude. Les zones plus en élévation se trouvent le long de la frontière américaine au sud, dans les Laurentides au nord de la région de Montréal et au nord de Québec où certains sommets atteignent les 1 000 mètres au-dessus du niveau de la mer.

La carte des degrés-jours de croissance par année à partir de 5 °C comporte cinq classes (figure 15). De façon générale, le territoire à l'étude cumule plus de 1 000 degrés-jours de croissance par année à l'exception de l'extrémité nord-est. Encore une fois, les unités de paysage régional le long du fleuve reçoivent le plus grand nombre de degrés-jours. Complètement au sud, en Estrie et en Chaudière-Appalaches, un grand nombre de degrés-jours sont également cumulés, au même titre que Lanaudière, les Laurentides, l'Outaouais et le sud du Témiscamingue. La Gaspésie et la haute Côte-Nord sont les secteurs cumulant le moins de degrés-jours de croissance.

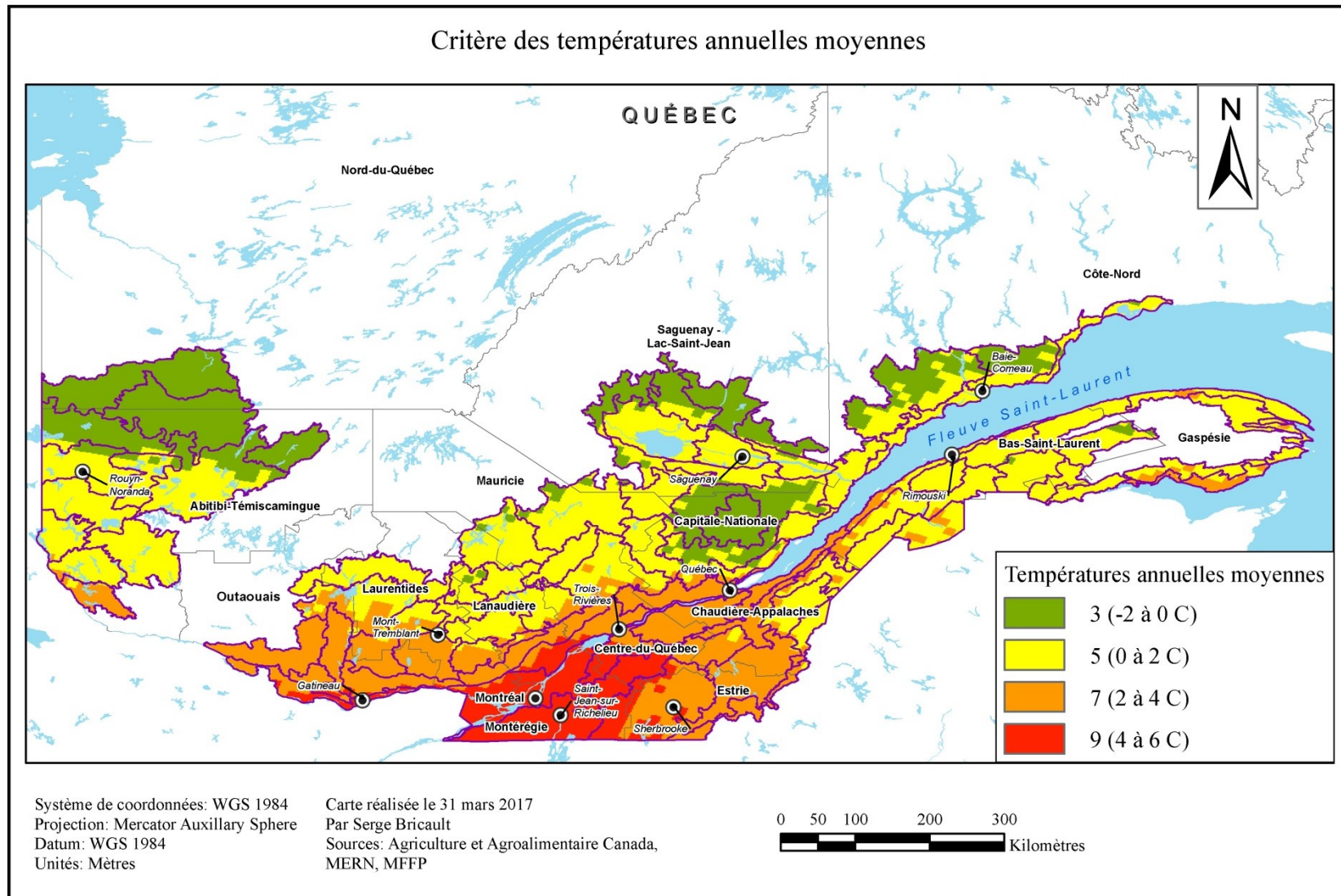


Figure 13 - Critère des températures annuelles moyennes

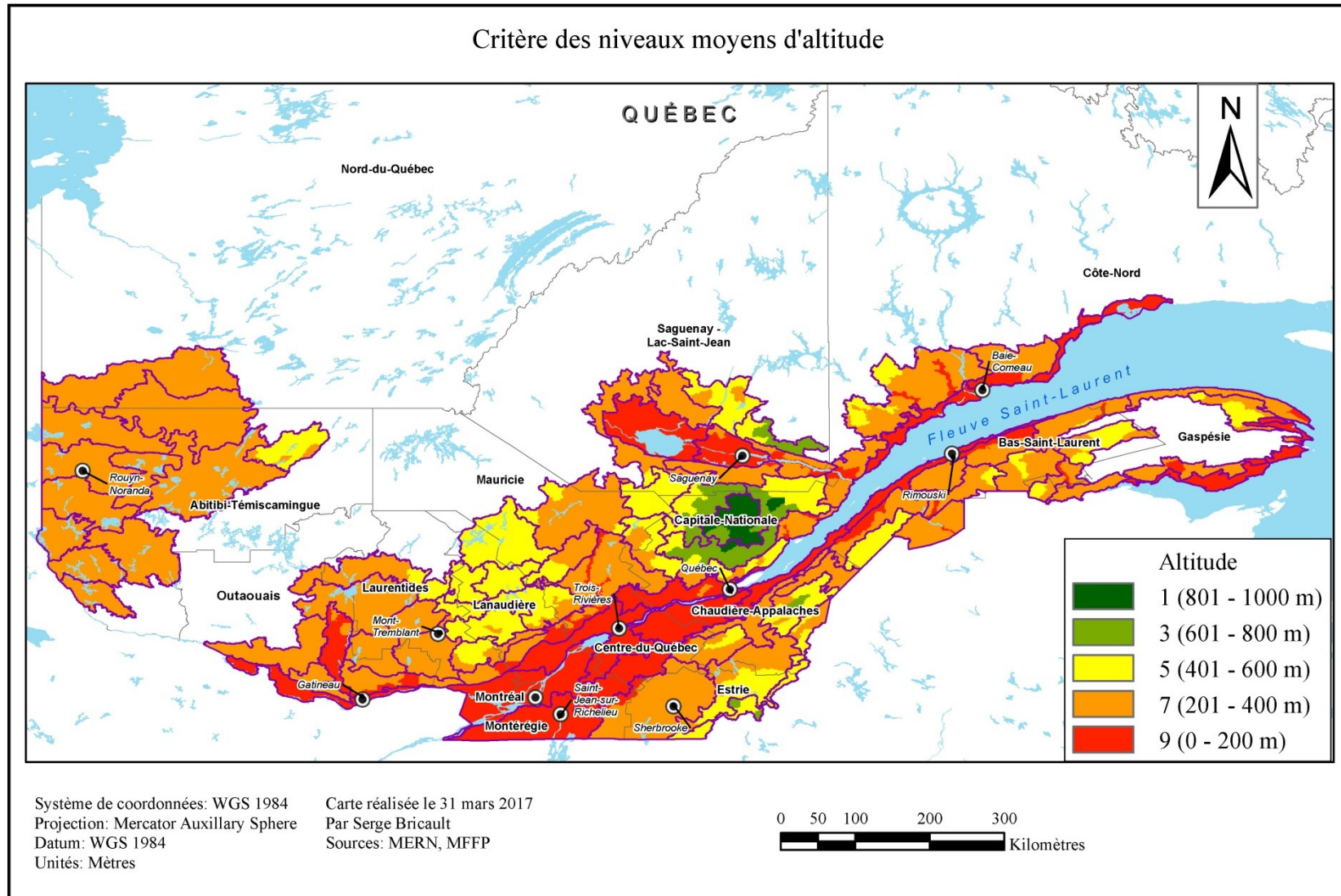


Figure 14 - Critère des niveaux moyens d'altitude

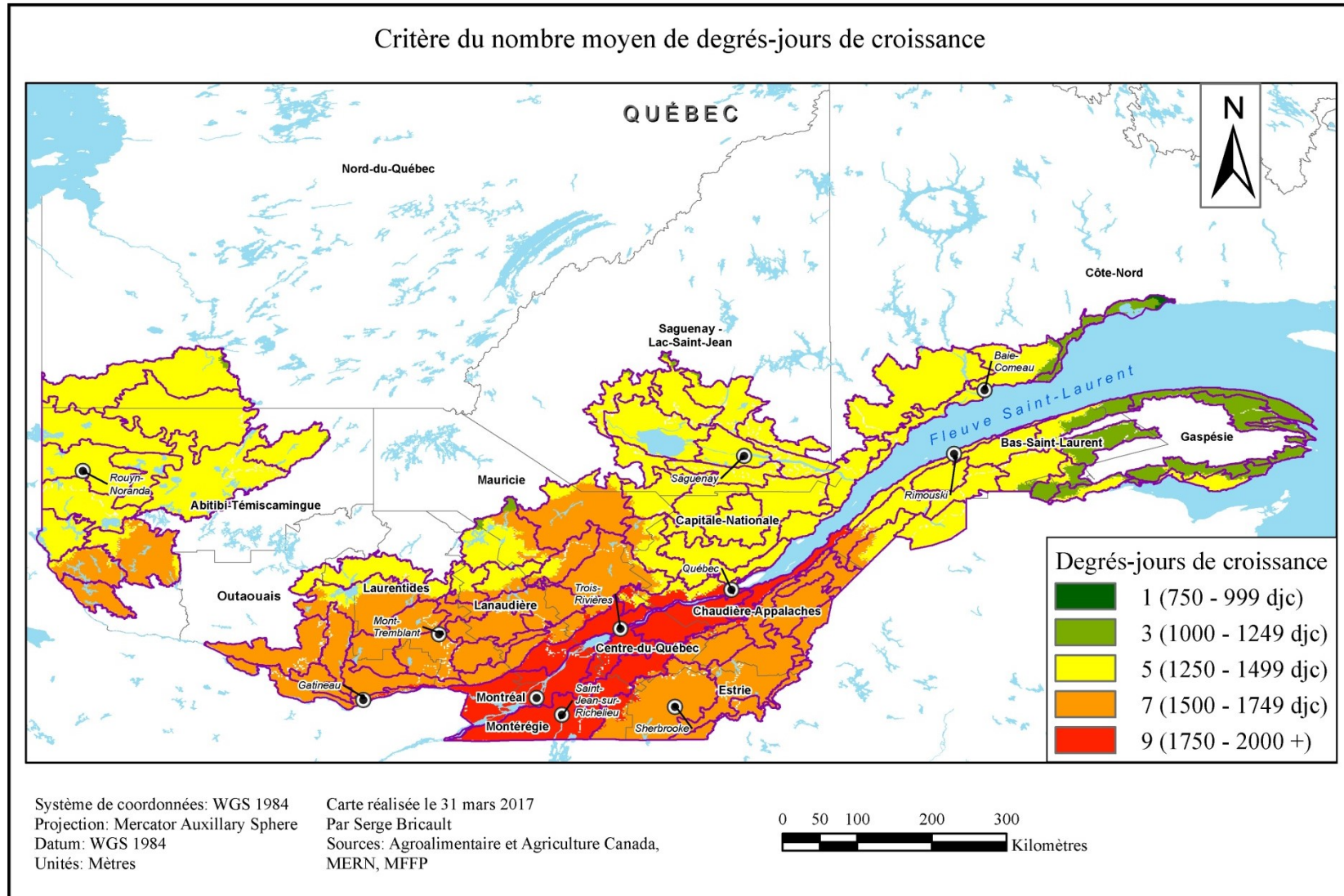


Figure 15 - Critère des degrés-jours de croissance annuels moyens (en base de 5 °C)

La carte des longueurs annuelles moyennes de la saison de croissance comporte quatre classes (figure 16). Poursuivant la même tendance que les critères précédents, le territoire le long du couloir fluvial, surtout au sud, comporte les plus longues saisons de croissance. L'extrême nord et l'est cumulent le moins de jours de croissance, alors que le reste des unités de paysage se partagent des valeurs de saison moyennes.

La carte des précipitations annuelles moyennes représente cinq classes (figure 17). De façon générale, l'ensemble des classes de précipitation sont suffisantes pour permettre la croissance des espèces d'arbres considérées dans le présent travail (voir annexe 1). La classe des précipitations les plus faibles se retrouve à l'extrême ouest de l'aire d'étude et est confinée à quelques unités de paysage tout au plus. Le scénario est semblable où on mesure les plus grandes quantités de précipitations fortement concentrées dans quelques unités de paysage entre Québec et Saguenay. Pour le reste du territoire, des niveaux moyens quelque peu supérieurs à 1 000 mm de précipitations en tout genre tombent chaque année.

La carte des zones de rusticité comportent six classes (figure 18). La classe zéro sert à éliminer quelques portions de territoire où la rigueur de l'hiver est trop sévère, c'est-à-dire où l'on retrouve les zones de rusticité 1a et 0. Ces endroits où la valeur est nulle sont peu nombreux et se localisent à la limite nordique des paysages de l'Abitibi et du lac Saint-Jean. Les autres unités de paysage affectées par la classe nulle se trouvent dans les hautes altitudes au nord de la ville de Québec. À l'inverse, les zones les plus hospitalières à la croissance des végétaux sont dans la région du grand Montréal et de la Montérégie. Les abords du fleuve et de la rivière des Outaouais sont également moins rigoureux envers la végétation et les rigueurs hivernales commencent à être limitantes pour certaines espèces plus au nord et vers l'est de la province.

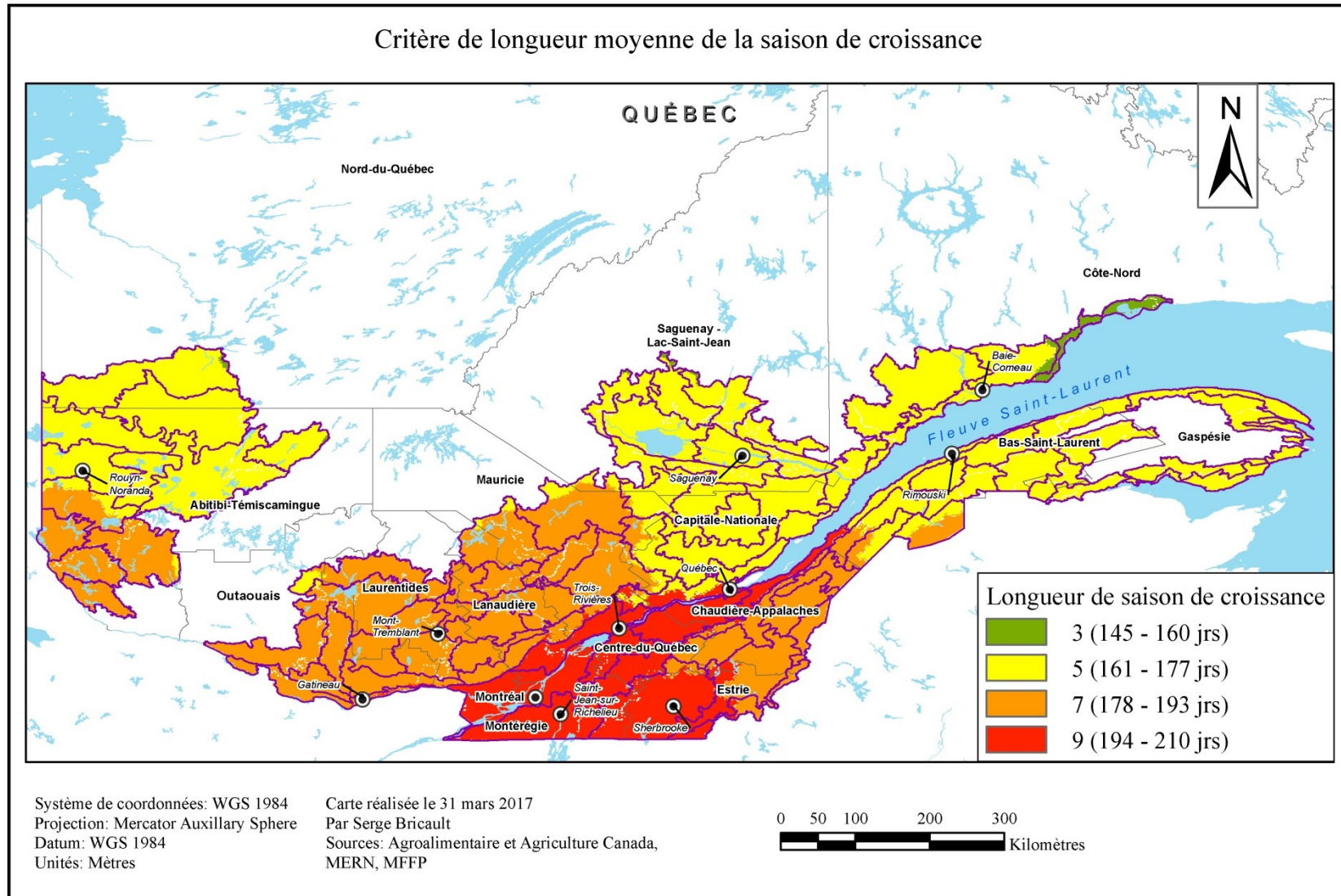


Figure 16 - Critère des longueurs annuelles moyennes de la saison de croissance

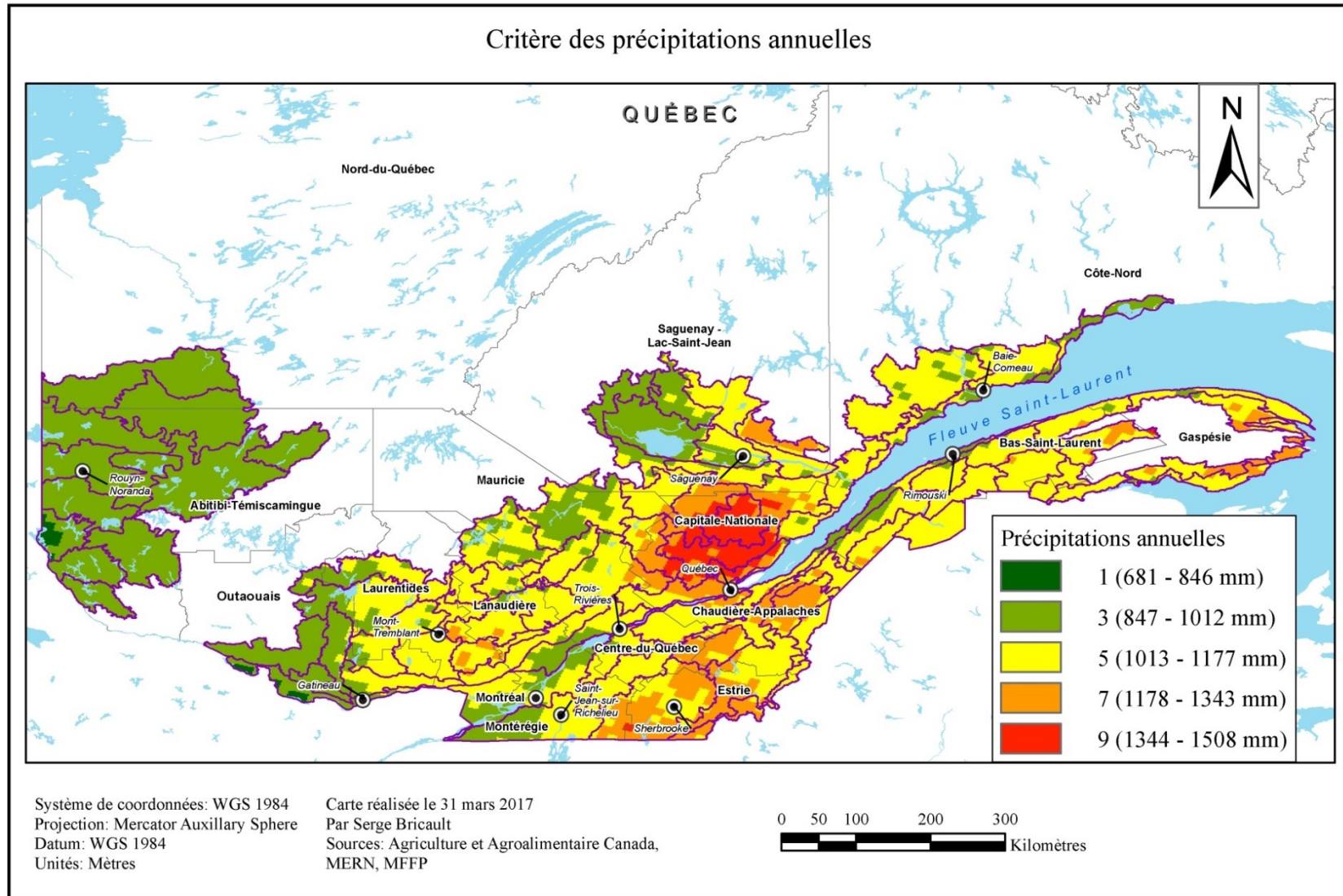


Figure 17 - Critère des précipitations annuelles

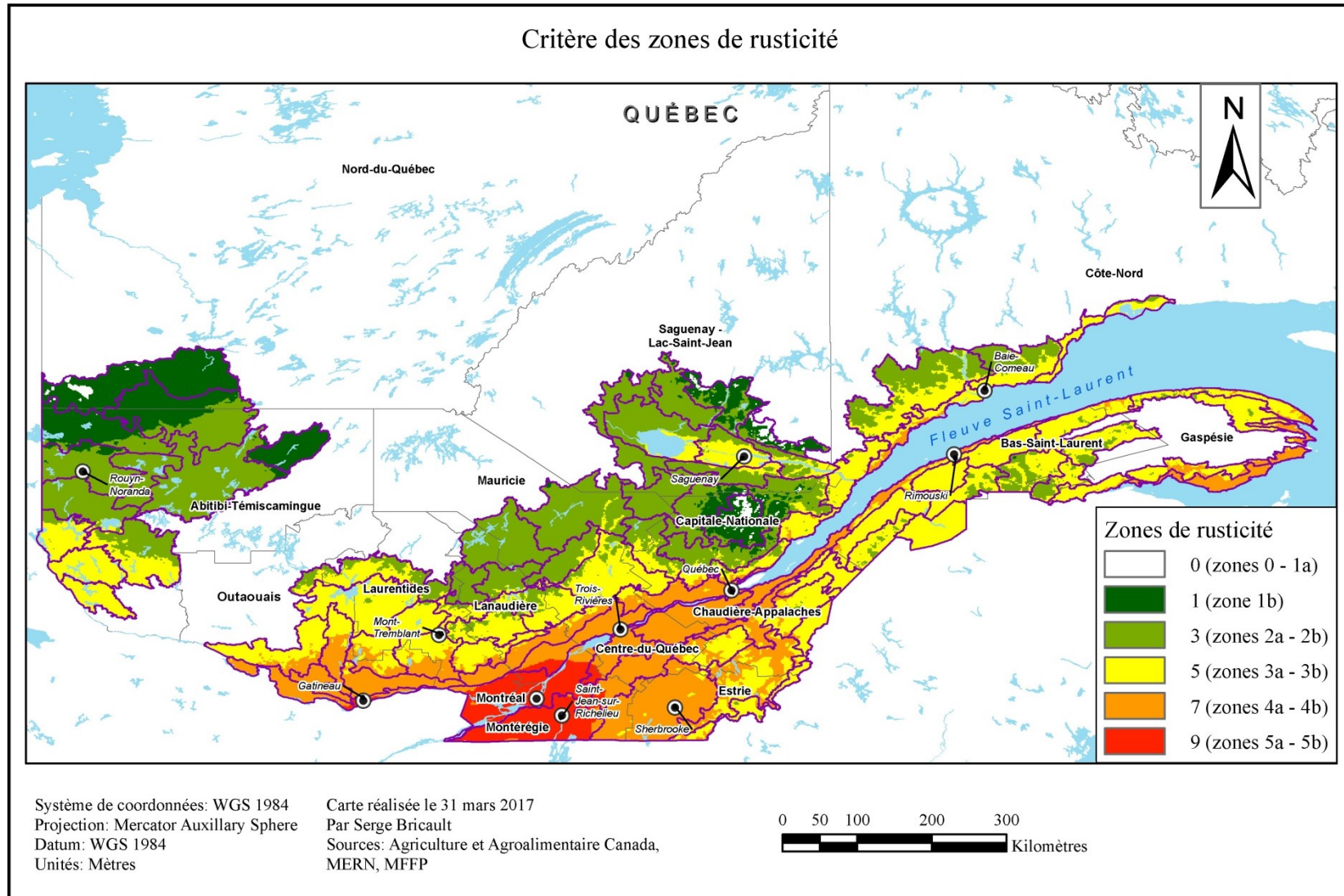


Figure 18 - Critère des zones de rusticité

La carte des cotes d'utilisation du territoire comprend cinq classes (figure 19). De façon générale, les endroits où se trouvent les plus faibles taux d'occupation humaine, et qui ont donc les cotes les plus faibles, se trouvent au nord du fleuve. La Gaspésie, la Côte-Nord et l'Abitibi-Témiscamingue sont d'autres régions dont l'occupation du territoire est principalement forestière. Les endroits en milieu campagnard et rural mais agricole sont en vert pâle et jaune, et se concentrent principalement dans le centre-sud du territoire avec quelques sites agricoles plus isolés un peu partout. Les zones plus densément peuplées dénotent la présence des centres urbains du site d'étude où la densité de clients d'Hydro-Québec est la plus élevée. Montréal et ses banlieues, Québec et Saguenay composent ces paysages en plus des communautés de Gatineau, Rimouski et quelque peu autour du lac Saint-Jean.

L'analyse des cartes permet d'obtenir un aperçu des endroits ayant les meilleurs potentiels de croissance pour la végétation pour chaque critère de façon individuelle. Pour sa part, le critère des cotes d'utilisation du territoire démontre où le distributeur d'électricité devrait concentrer ses efforts d'entretien des lignes du réseau de distribution simplement pour assurer la qualité de service et maintenir la satisfaction de sa clientèle. Toutefois, ce n'est qu'après avoir combiné ces différents critères, grâce à l'analyse multicritère par somme pondérée, qu'il est possible d'obtenir un regard global évaluateur sur l'importance relative de chaque unité de paysage en lien avec la priorité d'entretien à leur accorder.

L'étape finale de l'analyse multicritère réalisée avec le logiciel de SIG illustre les niveaux potentiels d'entretien de la végétation en fonction de la dynamique de croissance des espèces d'arbres poussant à proximité du réseau de distribution (figure 20). La carte ainsi produite permet de représenter la classe de chaque pixel sur l'ensemble du site d'étude. La classification a été effectuée selon la méthode manuelle voulant faire ressortir les emplacements de chaque cote par nombre entier selon sept classes. Plus la cote est élevée, plus le potentiel de croissance végétative est élevé, et plus le potentiel d'entretien l'est aussi. Ces classes de potentiel s'étendent de 2 à plus de 8 car aucune valeur n'était inférieure à 2 ni aucune n'atteignait le maximum de 9.

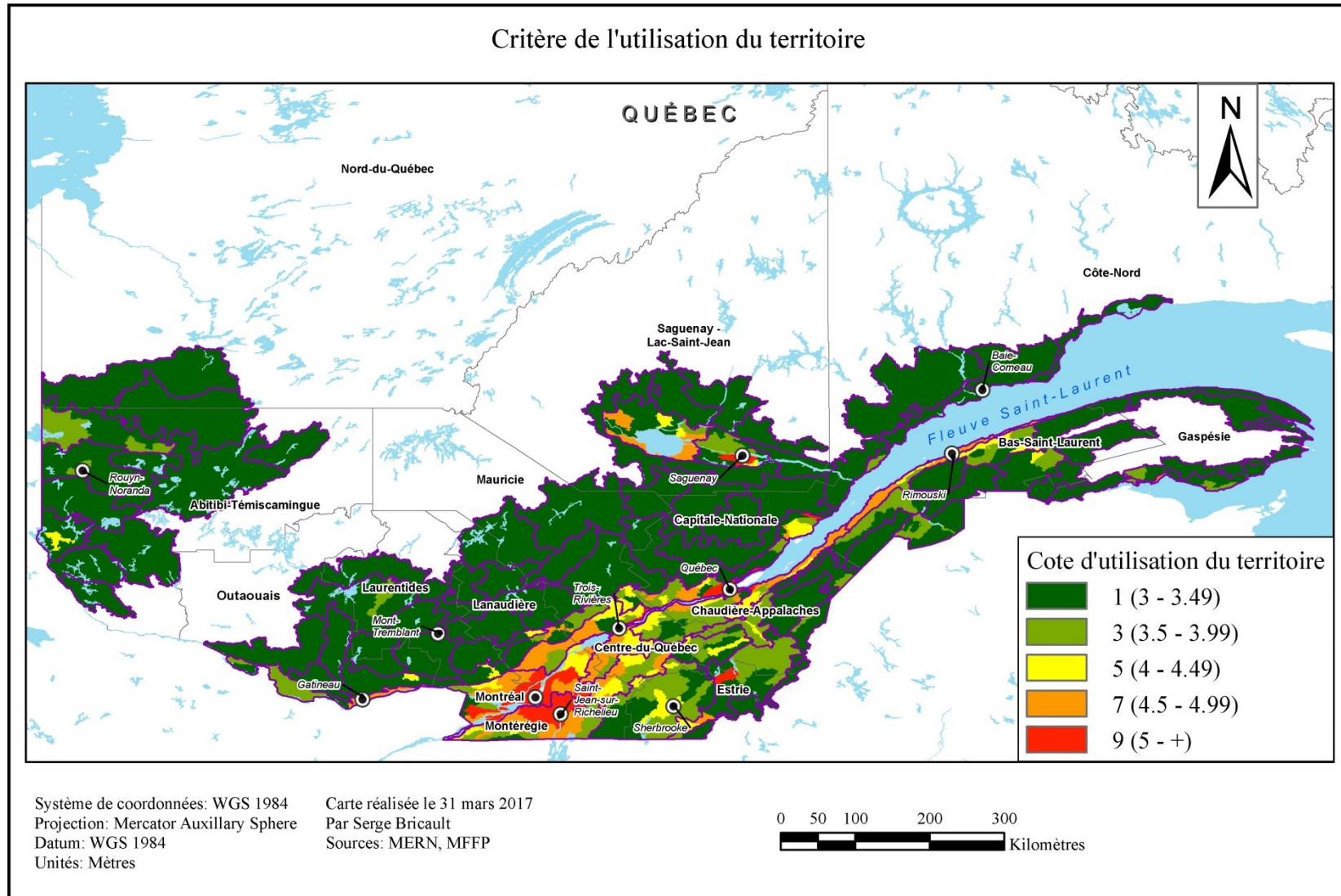


Figure 19 - Critère des cotes d'utilisation du territoire

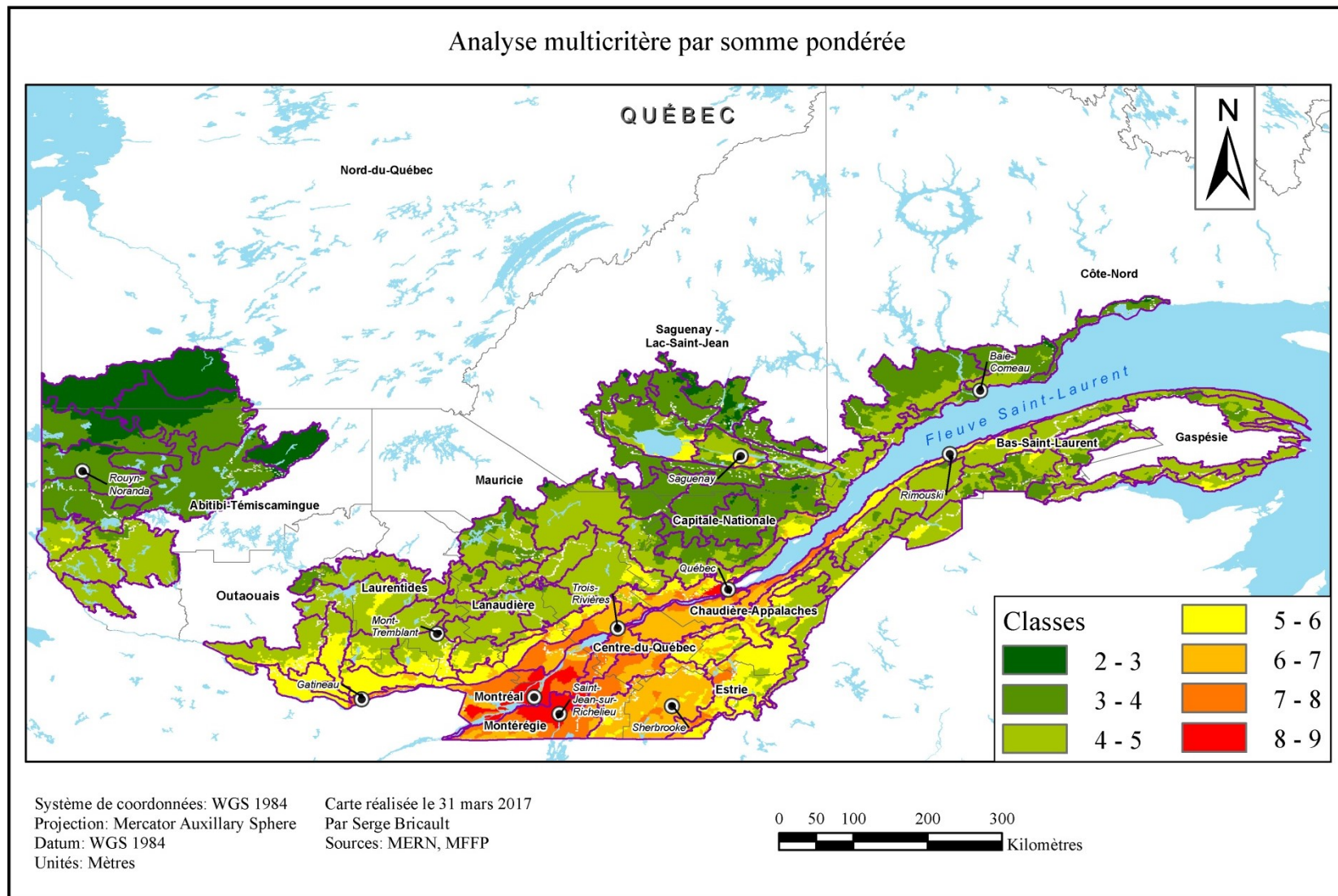
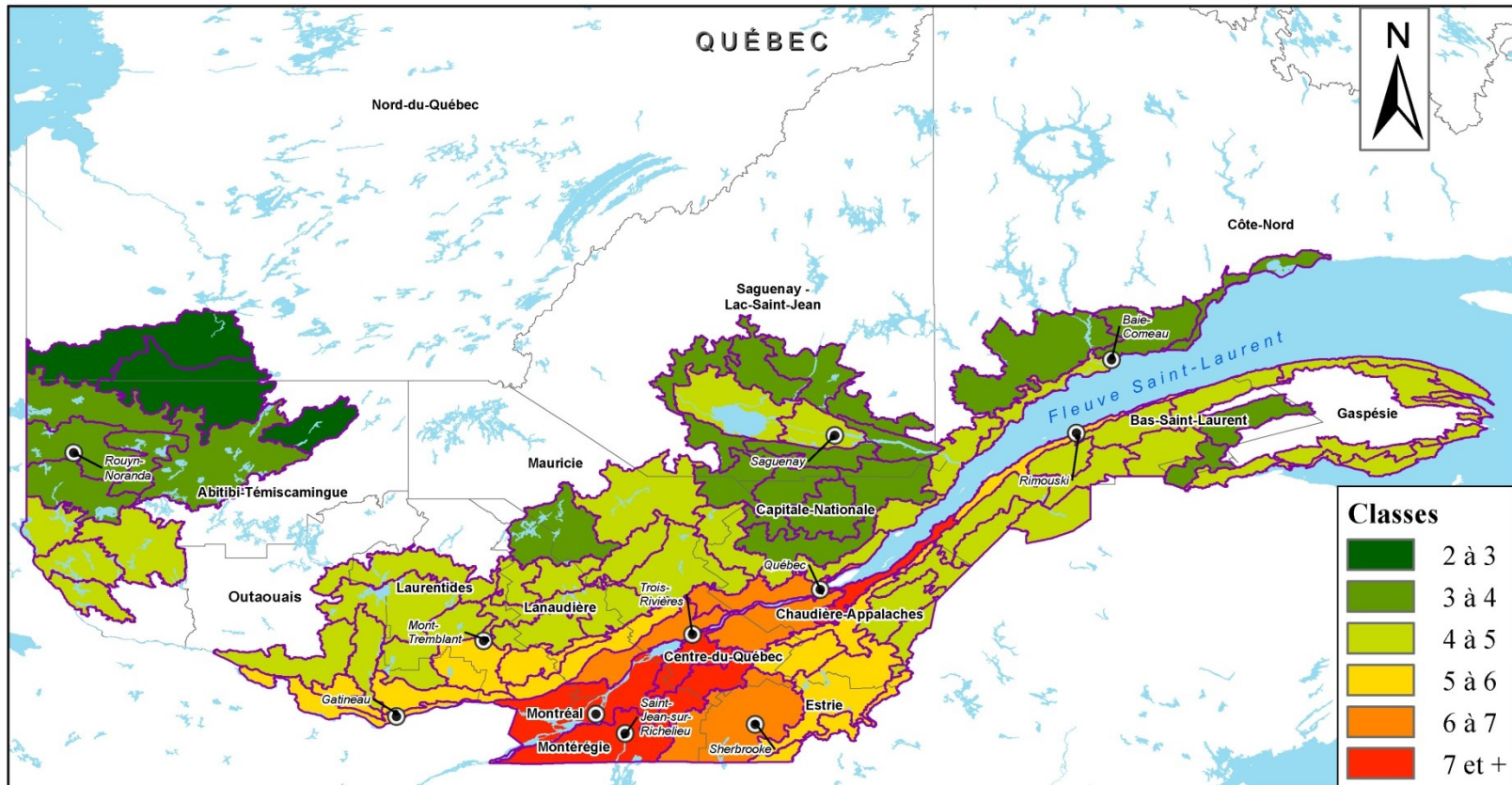


Figure 20 - Carte brute des niveaux potentiels d'entretien de la végétation en fonction du potentiel de croissance près des lignes hydroélectriques du réseau de distribution

Avant de procéder à l'analyse de la carte obtenue, il importe d'abord de considérer quelques éléments importants. D'abord les pondérations définies sont subjectives et peuvent être adaptées par les experts forestiers d'Hydro-Québec. Ensuite, tel que mentionné précédemment, les différents critères n'ont pas tous la même incidence sur le potentiel de croissance des arbres. D'ailleurs, la pondération apposée aux critères cherche à établir une importance relative de chacun d'eux par rapport aux autres, mais elle est également dépendante de l'âge de certaines données. En effet, les données les plus récentes datent de 2008 pour la longueur moyenne de la saison de croissance et le nombre moyen de degrés-jours de croissance. Les niveaux moyens d'altitude et les pourcentages d'utilisation du territoire ont été mis à jour en 2004 et le découpage des zones de rusticité, les précipitations et les températures annuelles moyennes datent de 2000. Le réchauffement planétaire des dernières années et les changements météorologiques associés ont certainement fait changer les valeurs de précipitations et de la thermopériode, ce qui permet d'insinuer que les résultats obtenus auraient tendance à sous-évaluer la progression de certains aspects climatiques importants.

Les données spatiales utilisées pour les calculs du potentiel de croissance n'ont pas toutes la même résolution spatiale ce qui a poussé à un dernier effort de généralisation pour obtenir la classe moyenne par unité de paysage régional. Cette manipulation permet d'obtenir une dernière carte qui rencontre l'exigence de l'objectif principal de départ de représenter le résultat final à l'échelle de l'unité de paysage régional (figure 21). Un tableau complet des statistiques de chaque unité de paysage est disponible à l'annexe 2. À cette échelle, la classe « supérieure à 8 » disparaît et la classe de valeur « 7 et plus » devient le nouveau seuil le plus élevé en tant que potentiel d'entretien de la végétation.

Analyse multicritère par somme pondérée par unité de paysage régional



Système de coordonnées: WGS 1984
 Projection: Mercator Auxillary Sphere
 Datum: WGS 1984
 Unités: Mètres

Carte réalisée le 31 mars 2017
 Par Serge Bricault
 Sources: MERN, MFFP

0 50 100 200 300
 Kilomètres

Figure 21 - Carte généralisée des niveaux potentiels d'entretien de la végétation en fonction du potentiel de croissance près des lignes hydroélectriques du réseau de distribution

5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Suite aux résultats obtenus (figure 21), les unités de paysage régional en rouge de la Montérégie, de Montréal, du Centre-du-Québec et celui au sud de la ville de Québec dans Chaudière-Appalaches sont celles ayant la cote la plus élevée. Ceci s'explique par une utilisation du territoire fortement urbanisée, les zones de rusticité les plus clémentes, l'ensemble des éléments de la thermopériode les plus avantageux et des précipitations annuelles suffisantes pour la vaste majorité des espèces végétales.

Au second rang, les unités de paysage en orange de l'Estrie de même que celles le long du fleuve Saint-Laurent entre Trois-Rivières et Québec ont obtenu la cote de valeur entre 6 et 7, principalement à cause d'une utilisation du territoire un peu plus agricole et forestière de même qu'une zone de rusticité légèrement moins propice.

C'est dans la classe de 5 à 6 en jaune que se trouve les unités de la vallée outaouaise ainsi que les Laurentides au sud de Mont-Tremblant jusqu'au nord de Trois-Rivières. L'est de l'Estrie et l'ouest de Chaudière-Appalaches sont dans cette même classe en plus de l'unité sur le bord du fleuve qui comporte Rimouski. Cette classe comprend davantage de territoire à occupation forestière mais tout de même de bons éléments de rusticité et de thermopériode permettant la croissance rapide des espèces problématiques.

La classe de 4 à 5 comporte le plus grand nombre d'unités de paysage. Ces 40 unités en vert pâle se trouvent majoritairement dans le tiers sud de l'Abitibi-Témiscamingue, les portions nordiques de l'Outaouais et des Laurentides, de même qu'en Mauricie. Les unités bordant directement le Saguenay-Lac-Saint-Jean et la basse Côte-Nord à l'ouest de Baie-Comeau sont également dans cette classe. S'ajoutent à ce lot celles au sud du fleuve Saint-Laurent, notamment la plus grande partie de Chaudière-Appalaches, Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie. Cette classe bénéficie de certains territoires agricoles ou d'une zone de rusticité favorable pour obtenir ce quatrième rang.

Les unités de la classe 3 à 4 forment le centre de l'Abitibi-Témiscamingue, la pointe nord de la jonction de Lanaudière-Mauricie, le massif forestier en altitude au nord de Québec, la frange forestière du Saguenay-Lac-Saint-Jean, le reste de la Côte-Nord au nord de Baie-Comeau, ainsi que deux unités forestières en altitude à l'extrême est du Bas-Saint-Laurent.

Pour finir en termes de potentiel de croissance dans la classe 2 à 3 les trois unités de paysage régional en vert foncé au nord de l'Abitibi-Témiscamingue, réunissant des cotes faibles au niveau de la zone de rusticité, de l'utilisation du territoire et de la majorité des éléments de la thermopériode.

Au chapitre des points discutables s'ajoutent à l'âge des données certaines incongruités selon la source. En effet, les valeurs de degrés-jours sont disponibles à partir de diverses sources et dans la plupart des cas, elles sont très semblables. Or, l'ouvrage de Robitaille et Saucier (1998) présente des valeurs beaucoup plus élevées que les données provenant des sites internet en référence d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013) et du MFFP (2016*b*) et n'ont donc pas été utilisées dans l'élaboration des critères.

Pour ce qui est des pourcentages de pondération utilisés dans ce travail, il est important de souligner qu'aucun expert du domaine n'a pu être consulté dans les délais du présent travail pour valider ou corriger les valeurs affixées à chaque critère. Seul le bagage académique à titre de bachelier en sciences forestières de l'auteur sert à valider les pondérations suggérées, bien qu'il est souhaitable d'obtenir l'opinion professionnelle d'un expert externe au projet. C'est la raison pourquoi nous nous sommes concentrés à développer un SIG générique et ouvert facilement adaptable par les experts d'Hydro-Québec selon leurs besoins.

D'ailleurs, Mouine (2011) signale la problématique centrale de l'analyse multicritère par somme pondérée. Il avance que c'est l'importance relative des différents critères donnés par assignation de coefficients de pondération de façon pas très précise qui influencent les résultats de l'analyse de façon plus ou moins importante. Donc, obtenir une analyse de sensibilité plus précise requiert de modifier des paramètres et d'examiner les nouveaux résultats obtenus par un processus d'essai et erreur. Il mentionne aussi que cette procédure peut rapidement devenir fastidieuse et coûteuse en temps et aboutit souvent à des résultats incomplets ou insatisfaisants.

6. CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude visait de concevoir un SIG générique et ouvert pour la création d'un indice du potentiel de la dynamique de croissance des arbres du Québec méridional à l'échelle du paysage régional, et ainsi mieux définir la périodicité des entretiens de la végétation autour des

lignes de distribution électrique. Cet objectif a été partiellement atteint dans la mesure où un SIG a été proposé pour faire l'analyse multicritère.

Initialement, Hydro-Québec voulait obtenir une cartographie détaillée du potentiel de croissance de la végétation en général du territoire. Suite à une définition grossière des critères recherchés pour l'analyse multicritère par un expert contact d'Hydro-Québec, nous avons choisi de développer un système beaucoup plus générique afin d'y intégrer des critères plus précis pour l'ensemble des experts chez Hydro-Québec.

Les critères qui ont été identifiés ont servi à lier le niveau potentiel de croissance des arbres en fonction du niveau potentiel d'entretien à effectuer en périphérie des lignes électriques par le distributeur. L'originalité de la présente étude provient de la réalisation d'une cartographie dédiée au potentiel de dynamisme de croissance des arbres à l'échelle de l'unité de paysage régional.

Outre la sélection des critères, qui a été majoritairement basée sur la littérature, une autre facette importante du présent rapport a été de définir des pondérations représentatives de la dynamique de croissance des arbres. Ces pondérations ont séparé les critères en quatre catégories : la thermopériode, les précipitations, les zones de rusticité et l'utilisation du territoire. L'importance associée à chaque critère a été mise de l'avant par l'auteur et à l'aide de ses connaissances académiques en la matière ainsi que ses expériences sur le terrain.

Le SIG a servi à mettre ensemble les sept critères grâce à l'analyse multicritère par somme pondérée. Une carte a été produite pour chaque critère afin d'illustrer et d'analyser la répartition de chaque classe sur le territoire à l'étude.

Enfin, la dernière carte démontrant les niveaux potentiels d'entretien de la végétation près des lignes du réseau de distribution en fonction du dynamisme de croissance permet d'obtenir un bon aperçu des endroits où les ressources devraient être priorisées, et donc de déterminer des périodes de cycle de retour adéquates en fonction des besoins illustrés.

Dans la suite des choses, la pondération des critères pourrait être révisée et modifiée au gré des décideurs chez Hydro-Québec pour les aider dans leurs travaux de planification. Si les résultats demeurent peu propices à leurs yeux, alors il serait possible d'expérimenter d'autres analyses avec plus ou moins de critères, et possiblement de séparer les analyses pour des critères d'origine

entièrement naturelle, ou encore pour des critères liés à l'influence et la présence humaine à proximité du réseau.

7. RECOMMANDATIONS

Il serait fort intéressant de refaire le travail avec des données à jour pour l'ensemble des critères. Le manque de temps pour géoréférencer l'ensemble de ces données (le plus souvent disponibles sous forme tabulaire) aura été le principal obstacle à une telle tâche.

D'autres critères pourraient être ajoutés à l'analyse portant sur l'étude des sols et la périodicité des précipitations pouvant avoir un impact sur le potentiel de croissance de la végétation. Par surcroît, l'indice de l'influence humaine sur les écosystèmes (IHI), mentionné par Lecigne *et al.* (2013), pourrait également être inséré dans l'analyse.

De plus, pour améliorer la fiabilité des résultats de l'analyse multicritère, il serait bon de réaliser une analyse de robustesse, tel que suggéré par Mouine (2011). Cette étape additionnelle permettrait d'évaluer l'amplitude de variation du résultat en fonction des variations au niveau des données ayant, par exemple, des âges différents.

En dernier lieu, on pourrait bonifier le présent travail avec des mesures de pousses annuelles prises directement sur le terrain partout sur le territoire, tel que mentionné entre autre dans les travaux de recherche de Lecigne. La chaire de recherche du CRSNG/Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance des arbres pourrait fort probablement fournir des données précieuses pour pousser l'analyse multicritère géospatiale à son plein potentiel. Ce serait la bonne voie pour transposer les classes de potentiel de croissance obtenues en données réelles permettant de fixer des cycles théoriques de retour de traitement les plus près possible de la réalité.

Références

Agriculture et Agroalimentaire Canada. (2013). Cadre écologique national pour le Canada. Site téléaccessible à l'adresse < <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/ecostrat/index.html>>. Consulté le 9 février 2017.

Agriculture et Agroalimentaire Canada. (2017). Zones de rusticité des plantes au Canada, 2000. Site téléaccessible à l'adresse < <http://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/689ecba9-4d19-4ea4-ba60-9b1c109f9a53>>. Consulté le 9 février 2017.

Barthélémy, D. et Caraglio, Y. (2007). Plant architecture : A dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annal of Botany*, 99, 375-407.

Brandt, J. P. (2009). The extent of the North American boreal zone. *Environ. Rev.*, 17, 101-161.

Burns, R.M. et Honkala, B.H. (1990). Silvics of North America. (2^e éd.) Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service (1^{re} éd. 1965).

Caillet, R. (2003). Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie. Montréal, Québec : CIRANO. (2003s-53).

Commission scolaire de Laval (CSL). (2014). Sensibiliser aux techniques d'élagage. Laval, Québec : Centre de formation horticole de Laval.

Corona, C. et Rovéra, G. (2007). Réchauffement climatique et dynamique forestière au 20^e siècle : la pinède de reboisement sur éboulis de la Courbe (Massif des Grandes Rousses, Alpes du Nord, France). *Géographie physique et Quaternaire*, 61, 181-194.

Daly, C., Widrlechner, M. P., Halbleib, M. D., Smith, J. I. et Gibson, W. P. (2012). Development of a new USDA plant hardiness zone map for the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 242-264.

Drobne, S. et Lisec, A. (2009). Multi-attribute Decision Analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging. *Informatica*, 33, 459-474.

ESRI. (2016). ArcMap – Présentation de l'analyse de superposition. Site téléaccessible à l'adresse <<http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-overlay-analysis.htm>>. Consulté le 23 novembre 2016.

Farrar, J. L. (1996). Les arbres du Canada. Saint-Laurent, Québec: Éditions Fides et Service canadien des forêts - Ressources naturelles Canada.

Follett, M., Nock, C. A., Buteau, C. et Messier, C. (2016). Testing a new approach to quantify growth responses to pruning among three temperate tree species. *Arboriculture & Urban Forestry*, 42:3, 133-145.

Gagné, C. (2000). *Tendance à long terme de la croissance de l'épinette noire en forêt boréale québécoise*. Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables, Université du Québec à Chicoutimi, Québec.

Housset, J. (2015). *Variations de croissance et capacité d'adaptation des populations marginales fragmentées d'arbres des zones boréo-montagnardes, en réponse aux changements climatiques*. Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal, Québec.

Hydro-Québec. (1998). Répertoire des arbres et arbustes ornementaux. (2^e éd.) Québec : Hydro-Québec.

Hydro-Québec. (2015). Lignes de distribution - Élagage, déboisement et abattage – Clauses techniques. Québec : Hydro-Québec.

Hydro-Québec. (2016). Rapport annuel 2015. Montréal, Québec : Hydro-Québec.

Hydro-Québec. (2017a). Histoire d'Hydro-Québec. Site téléaccessible à l'adresse <<http://www.hydroquebec.com/a-propos/qui-sommes-nous/histoire-hydro-quebec.html>>. Consulté le 16 février 2017.

Hydro-Québec. (2017b). Conseils de sécurité – Végétation près des lignes de distribution. Site téléaccessible à l'adresse <<http://www.hydroquebec.com/electricite-et-vous/vegetation-securite/>>. Consulté le 16 février 2017.

Hydro-Québec. (2017c). Comprendre l'électricité – Distribution aérienne. Site téléaccessible à l'adresse <<http://www.hydroquebec.com/comprendre/distribution/voie-aerienne.html>>. Consulté le 16 février 2017.

Kreyling, J., Schmid S., Aas, G. et Higgins, S. (2015). Cold tolerance of tree species is related to the climate of their native ranges. *Journal of Biogeography*, 42:1, 156-166.

Lecigne, B. (2013). *Effets des tailles de dégagement des réseaux électriques sur la colonisation de l'espace par les arbres, développement et mise en application d'une méthode d'analyse de données t-lidar*. Mémoire de maîtrise en biologie, Université du Québec à Montréal, Québec.

Lecigne, B., Follette, M., Nock, C., Delagrangé, S., Paquette, A. et Messier, C. (2013). *Identification des facteurs influençant la réaction des arbres aux tailles de dégagement des réseaux électriques*. Rapport de recherche. Chaire de recherche CRSNG/Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance des arbres.

Logan, T., Charron, I., Chaumont, D. et Houle, D. (2011). Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Site téléaccessible à l'adresse <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportLogan2011_FR.pdf>. Consulté le 9 février 2017.

Maingueneau, B. (2016). *Analyse multicritère pour l'implantation d'éoliennes aux îles de la Madeleine*. Mémoire de maîtrise en sciences géographiques – cheminement en géodéveloppement durable, Université de Sherbrooke, Québec.

McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Kesteven, J. L. et Venier L. A. (2001). Canada's plant hardiness zones revisited using modern climate interpolation techniques. *Can. J. Plant Sci.*, 81, 129-143.

McKenney, D. W., Hutchinson, M., Papadopol, P., Campbell, K. et Lawrence, K. (2006). The generation of USDA-equivalent extreme minimum temperature models and a comparison with Canada's plant hardiness zones. *Can. J. Plant Sci.*, 86, 511–523.

McKenney, D. W., Pedlar, J. H., Lawrence K., Papadopol, P., Campbell, K. et Hutchinson, M. F. (2014). Change and Evolution in the Plant Hardiness Zones of Canada. *BioScience*, 64:4, 341-350.

Ministère Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2002). Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : Vers une définition des bioclimats du Québec. Site téléaccessible à l'adresse <<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/classification/2discussion.htm>>. Consulté le 9 février 2017.

Ministère Économie, Science et Innovation (MESI). (2012). Crise du verglas. Site téléaccessible à l'adresse <<https://www.economie.gouv.qc.ca/ministere/resultats-de-recherche/?q=verglas>>. Consulté le 16 février.

Ministère Énergie et Ressources naturelles (MERN). (2010). La Base de données géographiques et administratives à l'échelle de 1/1 000 000. Site téléaccessible à l'adresse <<http://mern.gouv.qc.ca/territoire/portrait/portrait-donnees-mille.jsp>>. Consulté le 9 février 2017.

Ministère Énergie et Ressources naturelles (MERN). (2013). Consommation d'énergie par secteur. Site téléaccessible à l'adresse <<http://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-secteur.jsp>>. Consulté le 16 février 2017.

Ministère Forêts, Faune et Parcs (MFFP). (2016a). Système hiérarchique de classification écologique du territoire. Site téléaccessible à l'adresse <<https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-systeme.jsp>>. Consulté le 3 novembre 2016.

Ministère Forêts, Faune et Parcs (MFFP). (2016b). Les guides de reconnaissance des types écologiques. Site téléaccessible à l'adresse <<http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/guide-types-ecologiques-carte.jsp>>. Consulté le 9 février 2017.

Mouine, M. (2011). *Combinaison de deux méthodes d'analyse de sensibilité*. Mémoire de maîtrise en sciences informatiques, Université Laval, Québec.

Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec (OIFQ). (1997). Manuel de foresterie. Sainte-Foy, Québec: Les Presses de l'Université Laval.

Paquette, A. et Messier, C. (2011). The effect of biodiversity on tree productivity : from temperate to boreal forests. *Global Ecol. Biogeogr.*, 20, 170-180.

Publications Québec. (2014). Le guide sylvicole du Québec - Outil de comparaison des essences. Site téléaccessible à l'adresse
<<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/comparaison.php>>. Consulté le 8 février 2017.

Richer-Leclerc, C., Rioux, A., Beaudoin, M. F., Lapointe, D, Guillemettes, L. et Drapeau, R. (1993). Potentiel d'adaptation et de croissance d'arbres ornementaux sous les conditions climatiques du Québec et du nord-est ontarien. *Can. J. Plant Sci.*, 73, 557-567.

Robitaille, A. et Saucier, J.-P. (1998). Paysages régionaux du Québec méridional. Sainte-Foy, Québec: Les publications du Québec.

Rost, T. L., Barbour, M. G., Stocking, C. R. et Murphy, T. M. (1998). Plant Biology. Belmont, Californie, États-Unis: Wadsworth Publishing Company.

Silva, L. C. R., Sun, G., Zhu-Barker, X., Liang, Q., Wu, N. et Horwath, W. R. (2016). Tree growth acceleration and expansion of alpine forests : The synergistic effect of atmospheric and edaphic change. *Sci. Adv.*, 2: e1501302.

Williams, C. M., Henry, H. A. L. et Sinclair, B. J. (2015). Cold truths: how winter drives responses of terrestrial organisms to climate change. *Biological Reviews*, 90:1, 214-235.

Annexes

Annexe 1. Vitesses de croissance des arbres au Québec et intervalle de précipitation préférentielle.

Nom commun	Nom latin	Vitesse de croissance ¹	Vitesse de croissance ²	Vitesse de croissance ³	Vitesse de croissance ⁵	Intervalle précipitation (mm) ⁴
Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i>	rapide	rapide	rapide	rapide	300-1520
Bouleau gris	<i>Betula populifolia</i>	rapide	moyenne	rapide	nd	nd
Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i>	rapide	moyenne	moyenne	nd	640-1270
Cerisier de Pennsylvanie	<i>Prunus pensylvanica</i>	nd	rapide	rapide	nd	410-2030
Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i>	rapide	moyenne	rapide	moyenne	970-1120
Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i>	nd	moyenne-rapide	moyenne-rapide	moyenne	760-2030
Épinette blanche	<i>Picea glauca</i>	rapide	moyenne	moyenne	moyenne-rapide	250-1270
Épinette bleue du Colorado	<i>Picea pungens</i>	nd	lente	nd	lente-moyenne	460-610
Épinette de Norvège	<i>Picea abies</i>	nd	rapide	moyenne-rapide	moyenne-rapide	nd
Épinette noire	<i>Picea mariana</i>	lente	lente	lente	nd	380-760
Érable à Giguère	<i>Acer negundo</i>	rapide	très rapide	nd	rapide	nd
Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i>	nd	lente	lente	moyenne	510-2030
Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i>	rapide	très rapide	rapide-très rapide	rapide	810-1520
Érable de Norvège	<i>Acer platanoides</i>	nd	moyenne	nd	moyenne	nd
Érable rouge	<i>Acer rubrum</i>	nd	moyenne	moyenne	moyenne	nd
Frêne blanc	<i>Fraxinus americana</i>	rapide	rapide	rapide	rapide	760-1520
Frêne de Pennsylvanie	<i>Fraxinus pensylvanica</i>	rapide	rapide	rapide	rapide	380-1520
Mélèze laricin	<i>Larix laricina</i>	nd	moyenne	rapide-très rapide	moyenne	180-1400
Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i>	rapide	rapide	rapide	nd	380-1520
Orme de Sibérie	<i>Ulmus pumila</i>	rapide	très rapide	nd	rapide	nd
Peuplier à feuilles deltoïdes	<i>Populus deltoides</i>	très rapide	très rapide	très rapide	rapide	380-1400
Peuplier à grandes dents	<i>Populus grandidentata</i>	nd	rapide	rapide	nd	510-1520
Peuplier baumier	<i>Populus balsamifera</i>	nd	rapide	rapide	nd	300-1400
Peupliers faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i>	nd	rapide	rapide	nd	nd
Pin blanc	<i>Pinus strobus</i>	rapide	rapide	rapide	rapide	510-2030
Pin gris	<i>Pinus banksiana</i>	nd	lente	lente	moyenne	380-890
Pin rouge	<i>Pinus resinosa</i>	nd	moyenne	moyenne-rapide	nd	510-1010
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i>	nd	lente	lente	nd	760-1100
Saule	<i>Salix sp.</i>	nd	rapide-très rapide	rapide	rapide	nd
Thuya occidental	<i>Thuja occidentalis</i>	lente	lente-moyenne	lente	moyenne	710-1170
Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i>	nd	rapide	rapide	moyenne	530-1140

¹ : Farrar, 1996. ² : Hydro-Québec, 1998. ³ : Publications Québec, 2014. ⁴ : Burns et Honkala, 1990.

⁵ : OIFQ, 1997.

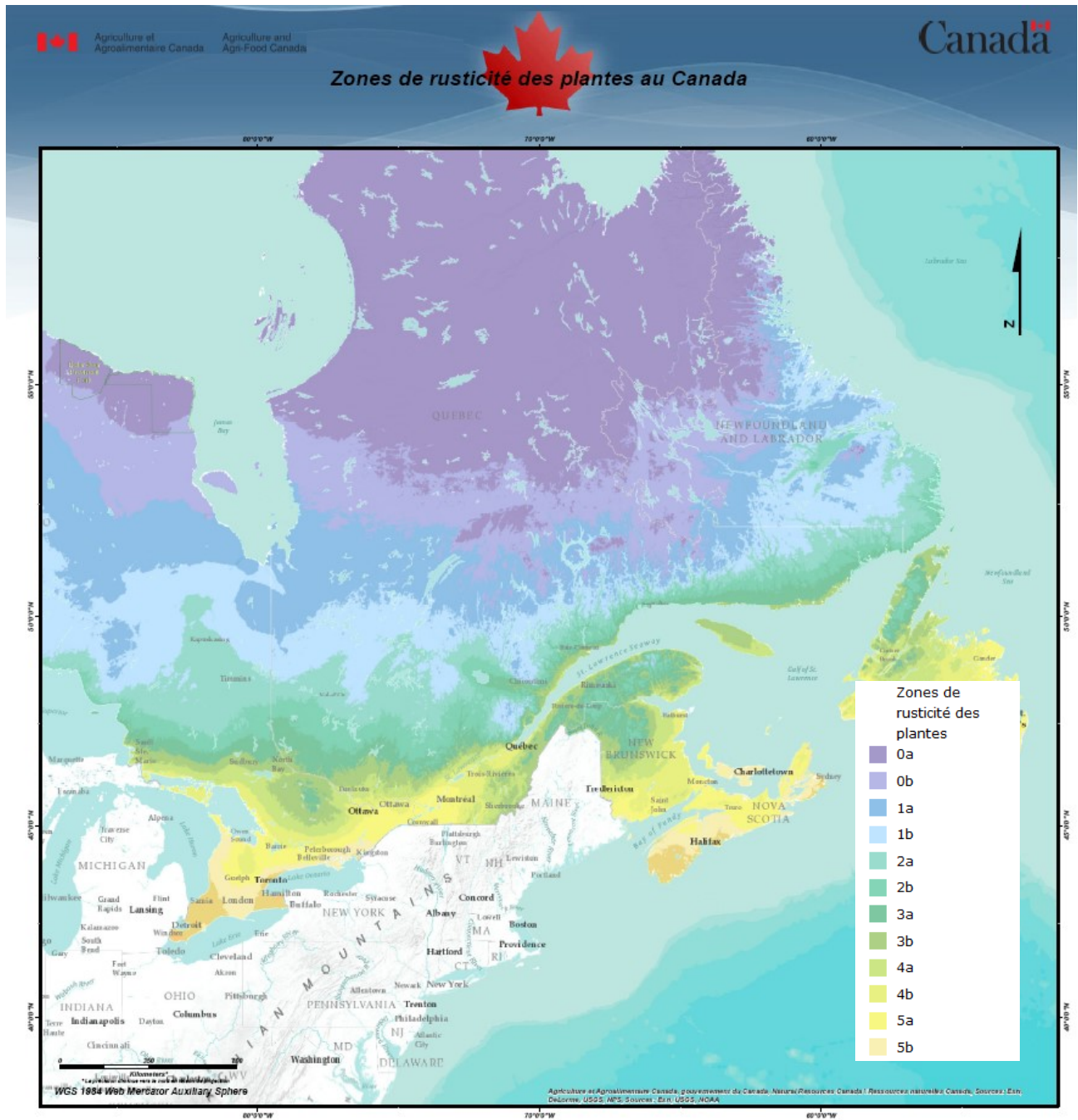
Annexe 2. Valeurs détaillées par unité de paysage régional suite à l'analyse multicritère par somme pondérée.

Classe	Unité de paysage régionale	Nombre de pixel	MIN	MAX	Intervalle	Moyenne	Écart-type	Région administrative
7 et +	2	2520	5.82	8.4	2.58	7.61	0.64	Montréal
	3	3490	5.88	8.4	2.52	7.59	0.73	Montréal/Montréal/Laval/Laurentides/Lanaudière/Centre-du-Québec
	10	1078	6.58	7.94	1.36	7.23	0.38	Montréal/Centre-du-Québec
	9	1447	6.22	7.94	1.72	7.1	0.43	Montréal/Estrie/Centre-du-Québec
	13	883	5.02	8.6	3.58	7.08	0.42	Chaudière-Appalaches/Bas-Saint-Laurent
6 à 7	7	1656	5.48	8.1	2.62	6.97	0.5	Lanaudière/Mauricie
	11	1889	5.78	7.7	1.92	6.59	0.39	Centre-du-Québec/Chaudière-Appalaches
	12	1279	4.38	8.16	3.78	6.43	0.95	Mauricie/Capitale-Nationale
	8	3864	5.18	7.4	2.22	6.35	0.32	Montréal/Estrie/Centre-du-Québec
5 à 6	33	1075	4.58	7.14	2.56	5.83	0.48	Centre-du-Québec/Chaudière-Appalaches
	1	1024	4.82	7.64	2.82	5.79	0.69	Outaouais
	31	2903	4.68	7.96	3.28	5.69	0.72	Estrie/Centre-du-Québec/Chaudière-Appalaches
	25	1541	4.88	7.4	2.52	5.61	0.53	Laurentides/Lanaudière/Mauricie
	32	1203	4.78	7.24	2.46	5.59	0.55	Centre-du-Québec/Chaudière-Appalaches
	64	790	3.88	7.1	3.22	5.55	0.46	Bas-Saint-Laurent
	6	1181	4.58	7.2	2.62	5.35	0.35	Outaouais/Laurentides
	30	774	4.54	6.48	1.94	5.24	0.46	Estrie/Chaudière-Appalaches
	23	1484	4.68	6.34	1.66	5.06	0.22	Outaouais/Laurentides
	26	1050	4.24	6.24	2	5.06	0.33	Laurentides/Lanaudière
	4	572	5.02	6.6	1.58	5.05	0.11	Outaouais
4 à 5	22	1244	4.58	5.32	0.74	4.99	0.21	Outaouais/Laurentides
	5	1110	4.48	5.42	0.94	4.97	0.25	Outaouais
	36	790	4.68	5.62	0.94	4.96	0.23	Chaudière-Appalaches
	34	1356	4.44	6.08	1.64	4.95	0.23	Chaudière-Appalaches
	35	619	4.68	5.78	1.1	4.87	0.22	Chaudière-Appalaches
	71	1150	4.08	6.2	2.12	4.85	0.3	Gaspésie
	56	620	3.74	6.56	2.82	4.79	0.66	Capitale-Nationale
	24	875	4.34	4.88	0.54	4.77	0.13	Laurentides
	29	2709	3.94	6.96	3.02	4.74	0.26	Lanaudière/Mauricie/Capitale-Nationale
	21	2602	3.88	5.34	1.46	4.69	0.24	Outaouais/Laurentides
	20	1717	4.58	5.58	1	4.67	0.18	Outaouais
	67	1191	3.64	5.64	2	4.66	0.38	Bas-Saint-Laurent
	27	1285	3.94	5.22	1.28	4.64	0.22	Laurentides/Lanaudière
	55	978	3.74	6.5	2.76	4.63	0.35	Capitale-Nationale
	63	1174	3.74	5.34	1.6	4.61	0.3	Bas-Saint-Laurent

	61	1383	3.64	6.18	2.54	4.6	0.37	Chaudière-Appalaches/Bas-Saint-Laurent
	28	2211	3.94	5.8	1.86	4.59	0.25	Laurentides/Lanaudière/Mauricie
	15	839	4.48	4.58	0.1	4.57	0.03	Abitibi-Témiscamingue
	59	1317	3.44	6.12	2.68	4.53	0.66	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	14	1255	4.38	4.58	0.2	4.48	0.04	Abitibi-Témiscamingue
	72	944	3.74	6.1	2.36	4.44	0.27	Gaspésie
	37	1150	3.64	5.3	1.66	4.33	0.36	Abitibi-Témiscamingue
	104	874	3.98	5.18	1.2	4.33	0.31	Côte-Nord
	52	1086	4.04	4.88	0.84	4.29	0.18	Lanaudière/Mauricie
	62	899	3.64	4.98	1.34	4.27	0.37	Chaudière-Appalaches/Bas-Saint-Laurent
	46	2101	3.44	4.78	1.34	4.23	0.3	Outaouais/Laurentides
	54	1396	3.64	5.08	1.44	4.23	0.32	Mauricie/Capitale-Nationale
	39	2422	3.44	4.48	1.04	4.21	0.26	Abitibi-Témiscamingue
	65	842	3.88	4.74	0.86	4.17	0.08	Bas-Saint-Laurent
	57	1178	3.49	4.74	1.25	4.16	0.15	Capitale-Nationale/Saguenay-Lac-Saint-Jean/Côte-Nord
	49	801	3.89	4.68	0.79	4.15	0.13	Laurentides/Lanaudière
	50	908	3.84	4.68	0.84	4.15	0.13	Lanaudière/Mauricie
	70	490	3.64	4.62	0.98	4.15	0.13	Bas-Saint-Laurent/Gaspésie
	73	1233	3.64	5.1	1.46	4.14	0.15	Bas-Saint-Laurent/Gaspésie
	74	1031	3.25	4.72	1.47	4.13	0.23	Gaspésie
	68	1316	3.2	5.1	1.9	4.11	0.41	Bas-Saint-Laurent/Gaspésie
	113	1014	3.34	4.62	1.28	4.1	0.19	Gaspésie
	60	2667	3.19	5.66	2.47	4.08	0.71	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	66	1086	3.64	4.38	0.74	4.08	0.21	Bas-Saint-Laurent
	53	3403	2.95	4.88	1.93	4.05	0.3	Mauricie/Capitale-Nationale
3 à 4	51	2459	3.24	4.34	1.1	3.99	0.25	Lanaudière/Mauricie
	108	1163	3.54	4.58	1.04	3.96	0.23	Bas-Saint-Laurent/Gaspésie
	58	792	3.44	4.72	1.28	3.95	0.28	Saguenay-Lac-Saint-Jean/Côte-Nord
	69	665	3.54	4.64	1.1	3.92	0.27	Bas-Saint-Laurent/Gaspésie
	38	2018	3.44	4.48	1.04	3.82	0.29	Abitibi-Témiscamingue
	94	1085	3.34	4.28	0.94	3.79	0.18	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	92	3524	2.73	6.12	3.39	3.74	0.33	Capitale-Nationale/Saguenay-Lac-Saint-Jean
	105	4310	3.19	4.28	1.09	3.74	0.32	Côte-Nord
	106	1937	2.84	4.28	1.44	3.7	0.37	Côte-Nord
	90	1479	3.34	4.34	1	3.68	0.15	Mauricie/Capitale-Nationale/Saguenay-Lac-Saint-Jean
	91	1678	2.83	4.04	1.21	3.6	0.26	Capitale-Nationale/Saguenay-Lac-Saint-Jean
	95	839	3.19	3.88	0.69	3.53	0.15	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	93	1583	2.83	4.04	1.21	3.47	0.23	Capitale-Nationale
	77	1370	3.19	3.44	0.25	3.4	0.09	Abitibi-Témiscamingue

	75	2238	2.75	3.9	1.15	3.38	0.25	Abitibi-Témiscamingue
	107	788	2.69	3.98	1.29	3.35	0.2	Côte-Nord
	79	4399	2.65	3.65	1	3.34	0.15	Abitibi-Témiscamingue
	98	1454	2.15	4.46	2.31	3.28	0.24	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	101	837	2.63	3.98	1.35	3.28	0.23	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	96	1070	2.15	4.67	2.52	3.18	0.15	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	99	1580	2.13	4.05	1.92	3.13	0.24	Saguenay-Lac-Saint-Jean
	76	2612	2.53	3.9	1.37	3.12	0.35	Abitibi-Témiscamingue
2 à 3	78	4357	2.75	3.44	0.69	2.94	0.22	Abitibi-Témiscamingue
	118	4328	2.15	3.21	1.06	2.74	0.08	Abitibi-Témiscamingue/Nord-du-Québec
	81	1277	2.05	3.19	1.14	2.67	0.12	Abitibi-Témiscamingue/Nord-du-Québec

Annexe 3. Carte des zones de rusticité du Québec.



Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada. (2017).